



FACULTAD DE INGENIERÍAS

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ASTROINGENIERÍA ALFA ORIÓN

Desarrollo de un radiotelescopio para la observación de la actividad solar en la banda KU

Trabajo de grado presentado por:

Juan Sebastian Vallejo Higueta

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
FÍSICO

Director del Trabajo de grado:

MSc. Edwin Andrés Quintero Salazar

Desarrollo de un radiotelescopio para la observación de la actividad solar en la banda KU

JUAN SEBASTIAN VALLEJO HIGUITA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Física

Pereira, febrero de 2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre y mi esposa, quienes me apoyaron en todo momento e hicieron posible llegar tan lejos.

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mi director de tesis MSc. Edwin Andrés Quintero Salazar, quien me apoyó y orientó durante todo el proceso de desarrollo de este trabajo, así como en mi formación académica, igualmente al Grupo de Investigación en Astroingeniería Alfa Orión, por guiarme y darme las herramientas necesarias para llevar a acabo este proyecto y a su vez brindarme la mano siempre que fue necesario.

También deseo expresar mis agradecimientos a Daniela Espitia y Astrid Daniela Henao, compañeras de carrera que me apoyaron y dieron su amistad en los momento más difíciles.

Por último quiero agradecer a mi madre Gloria Ines Higueta y a mi esposa Yaneth Valdivieso, ya que fueron mi apoyo incondicional, impulsándome siempre hacia adelante y nunca me dejaron desfallecer en estos largos años.

Contenido

Índice de figuras	6
Resumen	8
1 Introducción	9
1.1 Problema	9
1.2 Justificación	10
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo general	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 Estado del arte	11
2 Radioastronomía	19
2.1 Ondas electromagnéticas	19
2.2 Radiofuentes y clasificación	21
2.3 Radiotelescopio	21
2.4 Antena reflexiva	21
2.5 Radiorreceptor	22
2.6 Filtro	23
3 Desarrollo del Radiotelescopio	26
3.1 Radiotelescopio OAUTP	26
3.2 Ensamblaje de antena reflexiva	27
3.2.1 Simulación de la antena	29
3.2.2 Características de la antena	30
3.3 Montura	31
3.3.1 Características de la montura, controlador y fuente de alimentación	34
3.4 Montaje de LNB con buscador de satélites	35
3.4.1 Características del LNB	36
3.4.2 Características del buscador de satélites	36

3.5	Sistema de filtrado y amplificación	37
3.6	Complementos	39
3.7	Montaje completo	41
4	Funcionamiento	43
4.1	Puesta a punto	43
4.2	Ajuste galvanómetro	46
4.3	Conexión DAQ y adquisición de datos	46
4.3.1	Adquisición de datos	47
4.4	Seguimiento con el radiotelescopio	48
5	Resultados	51
5.1	Costos	51
5.2	Transito del Sol	51
5.3	Seguimiento del Sol	55
6	Conclusiones	56
A	Guía de Operación del Radiotelescopio	61
A.1	Software requeridos para el funcionamiento del radiotelescopio	61
A.2	Conexión	63
A.3	Encendido	65
A.4	Alineación	66
A.5	Manipulación por medio de spid MD-01	67
A.6	Toma de datos por medio de tránsito del Sol	68
A.7	Seguimiento con el radiotelescopio	70
A.8	Diagramas de conexiones	73

Índice de figuras

2.1	Espectro electromagnético. Tomado de: https://ie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/eem/	19
2.2	Ventanas ondas electromagnética. Tomado de: https://partner.cab.inta-csic.es/printable_section.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_2	20
2.3	Diagrama radiorreceptor.	23
2.4	Diagrama en Proteus red Sallen-key completa.	24
2.5	Diagrama en Proteus red Sallen-key pasa bajos.	24
3.1	Diagrama Radiotelescopio Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira	27
3.2	Partes que componen la antena.	28
3.3	Estructura de la antena.	28
3.4	Antena completa sin LNB	29
3.5	Patrón de radiación en 3D con valor de máxima ganancia.	30
3.6	Simulación de la antena en 2D.	30
3.7	Montura de alta resolución, 0,2°.	32
3.8	Controlador y fuente de alimentación.	32
3.9	Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante, para la fuente (a) y para los motores (b).	32
3.10	Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante, para los sensores de movimiento.	33
3.11	Diagrama de conexiones elaborado en el OAUTP.	33
3.12	Pulsadores (botones) controlador.	34
3.13	Montaje del LNB en la antena.	35
3.14	Imagen frontal (a) y posterior (b) del buscador.	36
3.15	Diagrama de Bode en MATLAB.	37
3.16	Montaje del filtro en Protoboard.	38
3.17	Simulación del filtro en Proteus.	38
3.18	Base en ángulo de Hierro.	39
3.19	Fuente 18 Volts.	40

3.20	Caja de conexiones principales.	40
3.21	Montaje parcial.	41
3.22	Montaje final.	42
4.1	Configuración de motores en la montura y configuración de la relación de engranajes.	44
4.2	Pantalla controlador.	44
4.3	LNB instalado en la base de acrílico.	46
4.4	Pines de conexión DAQ.	48
4.5	Programa para el seguimiento. Orbitron.	49
4.6	Ventana de información suministrada para el seguimiento. My DDE.	49
4.7	Software del controlador, configuración para seguimiento.	50
5.1	Imagen osciloscopio antes y después del filtro.	52
5.2	Toma de datos del Sol con y sin filtro.	53
5.3	Observación solar según el clima.	54
5.4	Seguimiento del Sol.	55
A.1	NI Max para controlar la DAQ.	62
A.2	Panel para verificar la conexión.	62
A.3	Software del controlador de la montura.	63
A.4	Conexión por USB para el controlador activada.	63
A.5	Montaje filtro en protoboard.	64
A.6	Conexión DAQ.	64
A.7	Controlador y Fuente de alimentación.	65
A.8	Fuente de alimentación buscador de satélites y LNB.	65
A.9	Buscador de satélites.	66
A.10	Pulsadores (botones) controlador.	67
A.11	Configuración de motores en la montura y configuración de la relación de engranajes.	68
A.12	Programa para el seguimiento, pestaña de ubicacion. Orbitron.	71
A.13	Programa para el seguimiento, pestaña de seguimiento.	72
A.14	Ventana de información suministrada para el seguimiento. My DDE.	72
A.15	Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante1.	73
A.16	Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante 2.	74
A.17	Diagrama de conexiones elaborado en el OAUTP.	74

Resumen

Eventos solares como fulguraciones o explosiones presentan intensa radiación en la banda KU (10–12.75) GHz, rango en el que opera la televisión satelital. Dado lo anterior, alrededor del mundo se evidencia el desarrollo de radiotelescopios que hacen uso de elementos propios de la televisión satelital, los cuales se caracterizan por su bajo costo y baja respuesta al ruido, esto debido a la evolución de los receptores en los sistemas televisivos. En este trabajo se presenta el desarrollo de un radiotelescopio para la observación del Sol en la banda Ku, integrado por una antena reflexiva o parabólica en malla, una montura de operación remota con capacidad de realizar seguimiento, un Low Noise Block (LNB) con un buscador de satélites y un sistema de filtrado. La antena permite el paso de aire a través de ella por las características de su estructura, presentando una ventaja debido a las condiciones climatológicas adversas de la región. El LNB y el buscador de satélites son los elementos que corresponden a la televisión satelital y son componentes del receptor de la señal. La montura otorga una libertad de movimiento de 360° en acimut y 180° en altitud, con resolución de movimiento de 0.2° . El radiotelescopio a registrado el tránsito solar con facilidad y los registros pueden visualizarse en la sección de resultados. El sistema desarrollado es fácilmente escalable debido a su arquitectura modular, permitiendo de esta manera ampliar o cambiar su frecuencia de funcionamiento. El sistema se encuentra instalado en el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Problema

Diferentes fenómenos astronómicos como la actividad solar, las emisiones de radio asociadas a planetas y sus lunas, la emisión del hidrogeno neutro (elemento más abundante en el universo conocido)¹, entre otros, son altamente estudiados por la radioastronomía ya que estos fenómenos son activos en ondas de radio. Además, la radioastronomía presentan ventajas como: un ancho de banda mayor al de la luz visible, no depende del clima y permite realizar observaciones las 24 horas. En vista de esto alrededor del mundo se han desarrollado diferentes instrumentos para estudiar estas ondas de radio, trabajando en las diferentes bandas de la radiofrecuencia. Algunos ejemplos son el estudio del clima espacial en 23.9 kHz (Jaramillo Alvarado et al., 2017), el caso de la observación de la actividad solar y joviana en 20.1 MHz (Rodríguez et al., 2016) y el proyecto ALMA² de 30 a 350 GHz. La banda KU (10 – 12.75 GHz) es utilizada para la operación de los sistemas televisivos por lo cual ha presentado un amplio desarrollo tecnológico. Esto ha permitido que sistemas de radioastronomía utilicen sus piezas, puesto que dichos sistemas trabajan en una frecuencia en la cual se pueden observar diversos fenómenos astronómicos antes mencionados. En la banda KU se encuentran instrumentos como: el desarrollo de un radiotelescopio en Alemania (Knöchel et al., 2005), un radiotelescopio portátil en India (Mandal et al., 2016) y la implementación de un sistema LNB en Cuba (Figueredo y Hernández, 2009). Sin embargo, algunos de ellos presentan dificultades como lo son un peso elevado en sistemas de gran envergadura (Figueredo y Hernández, 2009), la ausencia de movimiento automático con posibilidad de seguimiento (Tinti, 2013a), ruido en la señal obtenida (Bhatia et al., 2006) y costos elevados tanto en el sistema de filtrado como en el receptor de señal.

¹<https://culturacientifica.com/2017/01/20/hidrogeno-universo-i-la-emision-del-hidrogeno-neutro-21-cm/>

²<http://www.almaobservatory.org/es/sobre-alma/origenes-del-proyecto-alma>

El presente proyecto propuso desarrollar un radiotelescopio para la observación de la actividad solar, estudio de planetas y el centro de la galaxia en la banda KU, que cuenta con una antena de 1.2 m de diámetro en malla y de bajo peso que permite el flujo de aire para disminuir el torque generado a la estructura. La antena está ensamblada en una montura que permite el posicionamiento en los ejes de acimut y altitud, permitiendo así el seguimiento del objeto a estudiar. El receptor cuenta con un LNB y un buscador de satélites, ambos comúnmente usados en los sistemas de televisión por lo cual poseen una relación de señal/ruido óptima, además de contar con un bajo costo. Por último, la señal es filtrada y amplificada a través de un sistema electrónico de diseño propio, el cual está desarrollado para funcionar bajo las condiciones de ruido o interferencia presentes en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Este sistema complementa los dos ya existentes en la UTP (monitoreo de clima espacial en 23.9 KHz y actividad solar y joviana en 20.1 MHz), permitiendo así realizar observación solar, planetaria y la emisión del núcleo galáctico en ondas de radio (banda KU), generando la posibilidad de crear una base de datos de la actividad solar y el conocimiento de la Vía Láctea, la cual estará disponible para la comunidad científica mundial. Esto permitirá ampliar la participación no solo de la UTP sino también de Colombia en el escenario mundial de la radioastronomía.

1.2 Justificación

El radiotelescopio que se propuso construir está conformado por una antena de 1.2 m de diámetro tipo malla (cuadrícula de 6 mm), la cual capturará la señal procedente del objeto de estudio, pero al mismo tiempo permite el flujo del aire a través de su cuerpo, disminuyendo así el torque generado a la estructura por las condiciones ambientales (vientos, lluvias, etc.). A su vez esta está soportada en una montura de alta resolución, que presenta movimiento tanto en acimut como en altitud y que además permite realizar seguimiento automático, lo cual propicia observaciones durante largas jornadas (diurna y nocturna) de forma continua con una alta precisión. El conjunto cuenta con un LNB y un buscador de satélites como receptor, ya que estos funcionan en una frecuencia en la cual es posible estudiar diversos fenómenos astronómicos y al ser tan comúnmente usados su costo es reducido. Por último la señal recibida se filtra y amplifica mediante un radiorreceptor de diseño propio que está elaborado específicamente para trabajar bajo las condiciones de señal e interferencia electromagnética presentes en el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira (OAUTP).

Pensando a su vez en las condiciones climatológicas diversas presentes en la región, el radiotelescopio cuenta con piezas resistentes a la humedad y de mínimo mantenimiento, permitiendo a su vez realizar observaciones cuando el clima presente condiciones adversas. El sistema de

banda KU complementa los dos ya existentes en el observatorio (24 KHz y 20 MHz) ampliando así el ancho de banda no visible estudiado desde el observatorio astronómico UTP.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema para la observación de la actividad solar en la banda KU haciendo uso de dispositivos electrónicos propios de la televisión satelital.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el montaje y puesta a punto de los diferentes instrumentos presentes en el radiotelescopio.
- Diseñar y construir un radiorreceptor para el filtrado y acondicionamiento de las señales suministradas por el arreglo de antena, LNB y buscador de satélites.
- Implementar un software adecuado para el control de la antena y para la recepción, visualización y almacenamiento de las señales recibidas por el sistema.
- Construir una base de datos a partir de las señales recibidas del Sol y realizar los ajustes pertinentes a partir de los resultados obtenidos.

1.4 Estado del arte

El Sol es la estrella principal del Sistema solar. Es una estrella de edad media que presenta una gran actividad en su interior, la cual es objeto de estudio, ya que en ocasiones afecta negativamente la vida en la Tierra. El Sol irradia permanentemente energía en forma de luz, partículas con carga eléctrica y campos magnéticos; esto gracias a fulguraciones o explosiones solares que ocasionalmente son muy potentes y que podrían alcanzar la Tierra. Dichos eventos generan flujo de protones y neutrones a velocidades medias de 1,8 millones de Km/h , los cuales cubren prácticamente todo el Sistema solar (del Pozo García y Márquez, 2003), (Blanco Cano y Kajdic, 2019).

Esta radiación puede presentar peligros para naves espaciales o astronautas, interferir con las comunicaciones de radio, afectar a los satélites artificiales y desactivar redes de energía eléctrica, entre otros (Mendoza et al., 2006). Si bien el Sol se ha observado ampliamente a través de telescopios ópticos, se ha podido establecer que los fenómenos solares pueden ser

monitoreados en longitudes de onda no visibles para el ojo humano, como lo son las ondas de radio, para lo cual se emplean instrumentos electrónicos conocidos como radiotelescopios (Mendoza Torres et al., 2006). Una de las grandes ventajas que presentan estos instrumentos es que en muchas longitudes de onda no se presenta interferencia por la atmósfera terrestre, por lo cual las observaciones no están limitadas por las condiciones climáticas. Un ejemplo de estos fenómenos con alta emisión en longitudes de ondas no visibles son las fulguraciones, las cuales generalmente están asociadas a las manchas solares. Estas últimas presentan emisión importante en longitudes de onda de entre 2 cm y 9 cm, y su observación ha permitido determinar que varias manchas pequeñas concentradas aportan a la generación de fulguraciones (Rodríguez Taboada et al., 1992). Así mismo, el flujo protónico arrojado por el Sol está relacionado con radioemisiones en el orden de los GHz, que pueden ser medidas en tiempo real y por lo tanto interpretadas, haciendo posible generar predicciones de alertas del clima espacial (Valiente y Del Pozo, 2001). Considerando la velocidad del flujo protónico mencionada anteriormente, el tiempo de reacción frente a estas posibles alertas estaría entre 2 y 9 días aproximadamente.

La radioastronomía inicia en 1932 cuando Karl Jansky descubre que las comunicaciones radiotelefónicas presentan una interferencia procedente de la bóveda celeste, más específicamente de las regiones centrales de la Vía Láctea y hacia la constelación de Sagitario. En 1937 Grote Reber, ingeniero de radio, crea el primer radiotelescopio con la idea de continuar las observaciones que había realizado Jansky (Dorado y Grupo, 2007). Reber construye una antena parabólica de 9 m de diámetro con el fin de mejorar la recepción de la señal, obteniendo resultados positivos en frecuencias de 160 MHz. También fue la primera persona en estudiar minuciosamente el cielo, dando a la astronomía nueva información del Universo. A partir de estos descubrimientos en radio las antenas han evolucionado hasta llegar a montajes como el del proyecto ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array³), que cuenta con un conjunto de 54 antenas de 12 m de diámetro y 12 antenas de 7 m de diámetro, las cuales pueden ubicarse en diferentes configuraciones con tamaños desde 150 m hasta 16 km, permitiendo recibir frecuencias desde 30 GHz hasta 950 GHz, utilizando la técnica conocida como radiointerferometría⁴. Además de estos reconocidos radiotelescopios, alrededor del mundo se han generado proyectos de menor envergadura y de costo reducido, que haciendo uso de pequeñas antenas con un sistema de recepción de señal y un software especializado, permiten observar objetos puntuales como el Sol que se constituye como una de las más potentes radiofuentes que existe en el cielo. Estos proyectos de menor envergadura suministran información importante acerca de la actividad en ondas de radio de los cuerpos celestes, complementando

³<http://www.almaobservatory.org/es/sobre-alma/origenes-del-proyecto-alma>

⁴<https://www.almaobservatory.org/es/sobre-alma/observando-con-alma/tecnologias/receptores/>

los datos recopilados por los grandes radioobservatorios. Por ejemplo, para el caso particular del Observatorio Astronómico de la UTP, proyectos desarrollados con anterioridad han permitido la construcción de un radiotelescopio para el monitoreo del clima espacial en 23,9 kHz (Jaramillo Alvarado et al., 2017) y de un sistema para la observación de la actividad solar y joviana en la banda de 20,1MHz (Rodríguez et al., 2016).

Unas de las bandas más utilizadas en radioastronomía para el estudio de objetos celestes son la UHF (300 – 3000 MHz) y la SHF (3 – 30 GHz), esto debido a que fulguraciones o explosiones solares están en estos rangos, pero además el hidrogeno, elemento más común en el universo, emite en una frecuencia aproximada de 1420 MHz⁵. Esto dio pie a una de las primeras construcciones de radiotelescopios para la observación del Sol en la banda UHF, realizada por David Cleary en 1999 en Edmonton, Alberta (Cleary, 1999). Este proyecto usa elementos presentes en sistemas de televisión como los son la antena, un LNB (low noise block, por sus siglas en inglés) y un decodificador. Además cuenta también con un computador para el almacenamiento de la señal. El método de observación es llamado *tránsito* y consiste en apuntar la antena manualmente a un lugar en el cual pasará el objeto a estudiar. Cuando este haga su recorrido se almacenará la información que está relacionada directamente con la intensidad de la señal. Por medio de este método se puede observar tanto el Sol como la Luna, pero si se intenta aplicar esta técnica a un objeto más alejado no se obtiene información suficiente, esto debido a la falta de instrumentos como monturas automáticas o GPS que impiden un apuntado preciso.

Años más tarde se continua con la observación de cuerpos celestes en la banda SHF (3GHz – 30 GHz), cuando en el 2001 miembros del CVAS (Chippewa Valley Astronomical Society) en Estados Unidos (Tinti, 2013a) construyeron un sistema de bajo costo con la capacidad de realizar el seguimiento del Sol, usando un atenuador con el fin de mejorar la ganancia de la señal. Para esto se hace uso de elementos presentes en los sistemas de televisión satelital, como lo son una antena de plato, un LNB, un atenuador de 3 dB y un buscador de satélites; además cuenta con una plataforma móvil para facilitar su manejo y un GPS para un mejor posicionamiento. El sistema se desarrolló para operar en una frecuencia de 12 GHz. Al momento de tomar datos, primero se posiciona la antena en un lugar por el cual pasará el Sol, y tomando datos cada 30 segundos se identifica el valor máximo; de igual manera se apunta a un lugar vacío en el cielo para tomar una referencia del valor mínimo. Los autores observaron un buen funcionamiento del sistema en general, ya que la sensibilidad del arreglo instrumental permite captar diferencias entre el Sol, el cielo o el cuerpo de una persona. Por otra parte el atenuador permite mejorar la señal de salida dependiendo de su tipo, ya sea en

⁵<https://culturacientifica.com/2017/01/20/hidrogeno-universo-i-la-emision-del-hidrogeno-neutro-21-cm/>

voltios, dB u otro tipo de unidades usadas. Sin embargo, los autores reconocen la necesidad de que la montura de la antena sea automática con el fin de tener un mejor y más preciso posicionamiento, sin olvidar que el tiempo de toma de datos podría aumentar considerablemente.

En el mismo año se desarrolla un sistema que cuenta con todas las piezas necesarias para instalar un radiotelescopio de bajo costo (menos de \$ 3000 dólares para la fecha). El sistema fue elaborado en el Observatorio Haystack del MIT en Tyngsborough, Massachusetts (Pratap y Salah, 2001) y su objetivo es incentivar la ciencia en los estudiantes universitarios o de grados superiores en colegios. El kit cuenta con una antena de radio de 2 m, un receptor en una frecuencia de 1.42 GHz y una montura con movimiento en dos ejes (altura y acimut), que además puede ser ensamblado fácilmente. El kit permite observar objetos celestes como el Sol, la Luna, Cygnus o Cassiopeia, ya que los resultados así lo mostraron.

Años más tarde en 2003 en Brasil un conjunto de ingenieros y científicos en colaboración del Instituto Nacional de investigación Espacial INEP desarrollaron un radiotelescopio de bajo costo para observaciones de objetos celestes en frecuencias de 1.2 a 5 GHz, realizando a su vez un subsistema para la matriz de interferómetro conocido como Brazilian Decimetric Array (BDA) (Sawant et al., 2003). El sistema cuenta con una antena de 4 m, dos LNA desarrollados por el INPE, dos servomotores que permiten operar a 0.6 rpm y gracias a un conjunto de engranajes maneja un posicionamiento de 2.5 arco segundos a velocidades de vientos de hasta 60 *km/h*. El desarrollo de los LNA permite tener para uno características de 20 dB de ganancia y una cifra de ruido de 1.5 dB y para otro de 15 dB de ganancia y cifra de ruido 0.9 dB, pero este último de rango dinámico. La implementación de los servomotores permite realizar interferometría usando 5 antenas y se espera implementar un software que permita realizar corrección de errores para este proceso, mejorando de esta manera la precisión. Cada uno de estos sistemas completos tiene un costo aproximado de US \$ 13.000 y las pruebas presentaron resultados satisfactorios, permitiendo realizar observaciones de llamaradas solares intensas de larga duración, las cuales están asociadas a rayos X. De igual manera el sistema realizó observación de galaxias activas, objetos tipo BL Lacertae a 1.4 GHz y cuásares. Para objetos de baja frecuencia se investiga conjuntamente con datos obtenidos de altas frecuencia por el grupo de Michigan.

Posteriormente, en el año 2005, el Fraunhofer Institute IIS en Alemania (Knöchel et al., 2005) desarrolla un radiotelescopio de bajo costo (aproximadamente 6000 euros) para operar en la banda SHF, con la finalidad de ofrecer a los estudiantes la posibilidad de observar la bóveda celeste, generando a su vez interés por la ciencia y la tecnología. Para lograrlo se hace uso de elementos como una antena de plato de 1.2 m, un LNB y un buscador de

satélites, los cuales son elementos comunes en los sistemas de TV. También se hace uso de una montura automática y de una computadora. Se opta por estos componentes ya que los sistemas de televisión cuentan con satélites que transmiten a altas frecuencias, haciendo eficiente el diseño para usos en radioastronomía. Además, al instalar una montura controlable desde un computador se logra realizar un rastreo simple del objeto de estudio. El sistema desarrollado permitió a los investigadores capturar datos del Sol y la Luna, los cuales sirven como base para trabajos de grado posteriores relacionados con el análisis de estos datos. Sin embargo, una deficiencia que se presenta en la montura es la resolución muy baja, ya que pierde momentáneamente los objetos de estudio. Además, el uso de antenas de 1.2 m o más genera una carga adicional en su base si se presentan tormentas o vientos fuertes, ya que la superficie de la antena es sólida.

Otro ejemplo del desarrollo de radiotelescopios en la banda UHF consiste en el sistema construido por investigadores de la Universidad Politécnica de Cartagena en España llamado PROYECTO ARIAM (Aula-taller de Radioastronomía e Ingeniería de Antenas y circuitos de Microondas), el cual comenzó en el año 2006 (Gómez-Tornero et al., 2010). El proyecto abarcó la construcción de un LNA (low noise amplifier por sus siglas en inglés), fabricación e implementación de filtros y la construcción de un oscilador para reducir la frecuencia de la señal recibida. Además cuenta con una antena de 3 m, un computador para almacenar la señal y una montura automática. El LNA se diseña para manejar alta sensibilidad y ganancia, operar a una frecuencia de 1420 MHz, con una ganancia de 12 dB y un factor de ruido de 0.8 dB. Para desarrollar el oscilador se implementan amplificadores, filtros pasa banda y un oscilador a 108 MHz, obteniendo a la salida del sistema una frecuencia constante de 1296 MHz y 7.1 dB. Mezclando la señal del oscilador y del LNA se logra reducir la frecuencia a valores que pueden ser recibidos y procesados en un computador. La antena es de malla y se diseña para tener una distancia focal específica, esto para captar la mayor intensidad de la señal. Al final del proyecto los investigadores observaron que a pesar de que los instrumentos se diseñaron desde cero, no alcanzaron los resultados con las especificaciones planteadas inicialmente aunque sí con valores aceptables. Posteriormente en el año 2007 se mejoró el diseño del mezclador para reducir su tamaño y se disminuir las reflexiones de los puertos (es decir las pérdidas de retorno) (Sandoval Piqueras et al., 2017). Para lograrlo se hace uso de circuitos con líneas microtira y de Stubs consiguiendo la cancelación de las componentes espectrales que no interesan en la salida y mejorando así el espectro. El circuito finalizado es muy sensible a desbalanceo, es decir, cualquier pequeño cambio en los parámetros afecta a todos los demás, pero esto no indica que sea un mal diseño, ya que los resultados al ser comparados tanto con la simulación como con la señal de mezcladores comerciales, presentan una gran similitud. Sin embargo, es importante comentar que el equipo presenta unas pérdidas

de conversión de aproximadamente 20 dB, atribuidas al hecho de que el sistema opera con potencias que no se encuentra dentro de los márgenes establecidos por el fabricante.

En el año 2006 investigadores de la Agencia Espacial Europea en colaboración con Fraunhofer Institut de Alemania desarrollan un sistema para funcionar en la banda SHF. Este pequeño radiotelescopio se puede instalar fácilmente, haciendo posible su traslado a colegios y universidades, ayudando de esta manera a fomentar la ciencia y la tecnología en los estudiantes (Bhatia et al., 2006). El sistema cuenta con una antena de 1.2 m, un receptor en el rango de 10 a 12 GHz (banda Ku (Kurz-unten band por sus siglas en inglés)), un buscador de satélite, una montura automatizada y un computador (Bhatia et al., 2006). Uno de los beneficios que presenta el sistema es que sus componentes son intercambiables, permitiendo seleccionar configuraciones personalizadas, haciendo posible usar una antena de mayor o menor diámetro, usar un buscador de satélite modificado, instalar LNB de banda C o Ku permitiendo recibir señales desde los 1.4 GHz en adelante, entre otros. De esta forma los estudiantes aplican sus conocimientos para mejorar el sistema. En conclusión el proyecto permitió realizar mediciones del sol y la luna, aunque sus falencias están presentes al momento de hacer seguimiento ya que la resolución de movimiento puede ser más baja, al igual que la relación señal-ruido. Estas falencias incentivan a las personas a construir sus propias piezas para mejorar así el sistema en general.

Años después en 2009 el Instituto de Geofísica y Astronomía en la Habana Cuba (Figueredo y Hernández, 2009) logra implementar un sistema LNB en una de sus antenas, esto con el fin de actualizar los dispositivos electrónicos que ya eran obsoletos para la época, sin incurrir en un gasto elevado, y sin olvidar que la señal obtenida debe contener igual información. Además de estas dos piezas también se cuenta con un buscador de satélite, un amplificador de DC, cableado para el tipo de exigencias, alimentación eléctrica y un computador. Este LNB funciona en un rango de 12.2 a 12.7 GHz y se optó por hacer un seguimiento al Sol ya que esto facilitaría una comparación con otros receptores antiguos. En general la implementación del sistema no presentó mayor reto ya que algunos elementos como la antena, el computador, entre otros, se reutilizaron. Los resultados fueron satisfactorios, puesto que comparando la señal obtenida por sistemas anteriores, la del LNB presentaba una mejor relación señal/ruido, aumentando de esta manera la sensibilidad del sistema.

En el 2013, en la Universidad de Bolonia, Bolonia, Italia, implementaron un radiotelescopio de 12 GHz, el cual es de bajo costo y tiene la capacidad de facilitar la enseñanza. Esto debido a que los radiotelescopios comunmente son de precios elevados y por lo tanto el público en general no tiene acceso a ellos (Tinti, 2013b). Para la manipulación de la señal hicieron

uso de amplificadores y filtros, aparte el sistema cuenta con una antena de plato y un LNB que además de ser económico, presenta una respuesta baja al ruido, permitiendo captar un mayor rango de temperaturas. Después de obtener la señal del LNB ésta pasa por conjunto de amplificadores (uno comercial y otro de televisión). Como la señal sigue presentando alto contenido de ruido, se filtra para trabaja con un ancho de banda menor aproximadamente de 200 MHz y gracias a la naturaleza del sistema (LNB) la señal puede ser obtenida independiente de su ubicación, ya que pruebas en diferentes lugares de Bolonia así lo demostraron. Es importante que el sistema manipule y almacene rápidamente la señal obtenida, puesto que un evento solar puede durar pocos segundos. Los autores afirman que el sistema cumple a cabalidad su función didáctica, pero podría ser más preciso.

Posteriormente en el año 2016 la Universidad en Pune, India, se presenta un radiotelescopio que implementa un Arduino Uno y un conjunto de motores DC para automatizar el movimiento de una antena (Dhande, 2016). El sistema además cuenta con elementos como la antena de 1.2 m, un LNB (10 a 12 GHz), un buscador de satélite, voltímetro y computador. Gracias al sistema de Arduino es posible hacer seguimiento a objetos celestes, haciendo uso de una GUI en MATLAB y desde allí controlar los motores, se opta por hacer un seguimiento al Sol. Además se hace uso de un voltímetro para medir la intensidad de la señal recibida por el buscador de satélite, ya que es una de sus funciones básicas, y en este caso al observar el Sol una mayor intensidad puede estar relacionada con una explosión solar. Para los fines educativos del proyecto, el sistema entrega suficiente información del Sol, pero para mejorar la señal sería adecuado crear desde cero tanto el LNB como el buscador de satélite, ya que esto disminuiría el ruido.

Este mismo año en Thiruvananthapuram, India se crea un radiotelescopio portátil, haciendo uso de piezas presentes en sistemas de televisión satelital. La finalidad es poder llevar el radiotelescopio a escuelas y universidades, para incentivar a los estudiantes a incursionar en la astronomía (Mandal et al., 2016). El sistema cuenta con una antena de 0.68 m, un LNB, un buscador de satélites, un Arduino Uno, un sistema de alimentación y una computadora. Este sistema a diferencia de los anteriores usa el Arduino para recibir y manipular la señal antes de pasarla al PC. El apuntado se realizó de forma manual y utilizando Stellarium como referencia. Previamente se realizó una calibración ayudados de un satélite geoestacionario y con esto se calculó la potencia por unida de voltaje. Los resultados mostraron que es posible recibir valores del Sol, Saturno y hasta de un brazo de la Vía Láctea, además el hecho de usar elementos comunes permite a los estudiantes e investigadores cambiar o manipular las piezas para obtener una mejor respuesta. Sin embargo el hecho de no contar con una montura motorizada y automática puede dificultar la toma de datos.

Como se menciona en los párrafos anteriores, alrededor del mundo se han construido un gran número de radiotelescopios para la observación de objetos celestes en la banda de los GHz, aunque se han evidenciado falencias como los son la ausencia de sistema de seguimiento, baja resolución de movimiento de montura, peso excesivo en sistemas de gran tamaño, ruido en la señal captada y alto costo en los materiales. Sin embargo, estos instrumentos han sido muy valiosos para la radioastronomía ya que han permitido estudiar objetos como nuestro Sol o descubrir discos protoplanetarios⁶, ampliando de esta manera el conocimiento de los fenómenos espaciales. En vista de esta situación este proyecto propuso elaborar un radiotelescopio con el uso de una antena de 1.2 m en malla lo cual aligera su peso y permite el paso del viento para disminuir el torque generado al sistema, una montura de alta resolución programable con un movimiento de 0.2 grados, con LNB y buscador de satélite de sistemas de televisión que lo hacen económico y con un sistema de filtrado de diseño propio que permite optimizar la señal recibida ya que está elaborado bajo las condiciones de ruido que se presentan en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). El sistema propuesto complementa los ya existentes en el observatorio astronómico de la UTP, estos son el monitoreo del clima espacial en 23,9 kHz y el radiorreceptor para la observación de la actividad solar y joviana en la banda de 20,1 MHz, logrando de esta manera ampliar la participación no solo de la UTP sino también de Colombia en el escenario mundial de la radioastronomía.

⁶<https://www.almaobservatory.org/es/sobre-alma/observando-con-alma/capacidades/formacion-de-estrellas-y-planetas/>

Capítulo 2

Radioastronomía

2.1 Ondas electromagnéticas

El espectro electromagnético está compuesto por todo un conjunto de ondas, las cuales pueden ser visibles o no. La astronomía óptica ha empleado telescopios para el estudio de los cuerpos celestes, estos sistemas se basan en el análisis de la luz visible provenientes del objeto de estudio. Hoy en día se conoce que los cuerpos celestes emiten en un rango más amplio que el visible, el cual incluyen las ondas de radio ver Figura 2.1 (Fontal et al., 2005).

La parte del espectro que compone el rango visible es pequeña, y se puede ver afectado con facilidad por cuestiones climáticas y de distancia. Por su parte las ondas de radio componen un rango mucho más amplio en el espectro, en su mayoría cruzan la atmósfera sin problemas y pueden viajar a través del espacio sin verse afectadas.

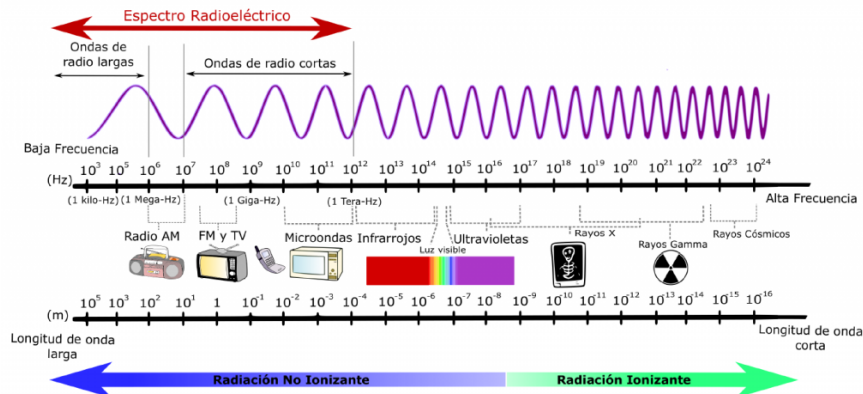


Figura 2.1: Espectro electromagnético. Tomado de: <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/eem/>

Ahora bien, toda radiación electromagnética posee unas características asociadas al medio en

el que se desplaza, por ejemplo en el vacío la velocidad de desplazamiento es de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, este valor corresponde a la constante de la velocidad de la luz (c). Esta constante relaciona de manera inversa la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) de las ondas electromagnéticas con la ecuación (2.1.1) (Bianchi, 2004).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1.1)$$

Todo el conjunto de ondas electromagnéticas no ingresan a la Tierra, ya que la atmósfera terrestre por sus características actúa como un filtro para una gran parte del espectro, por ejemplo la radiación ultravioleta, rayos x y rayos gamma en su mayoría no ingresa hasta la superficie terrestre. Sin embargo la luz visible y las ondas de radio se ven afectadas en menor medida por la atmósfera.

La banda Ku está ubicada aproximadamente en la unión de las ondas infrarrojas y las ondas de radio, observando la Figura 2.2, lo cual indica que estas longitudes de ondas ingresan hasta la superficie terrestre, pero pueden interactuar en menor medida con las partículas de agua presentes en el ambiente.

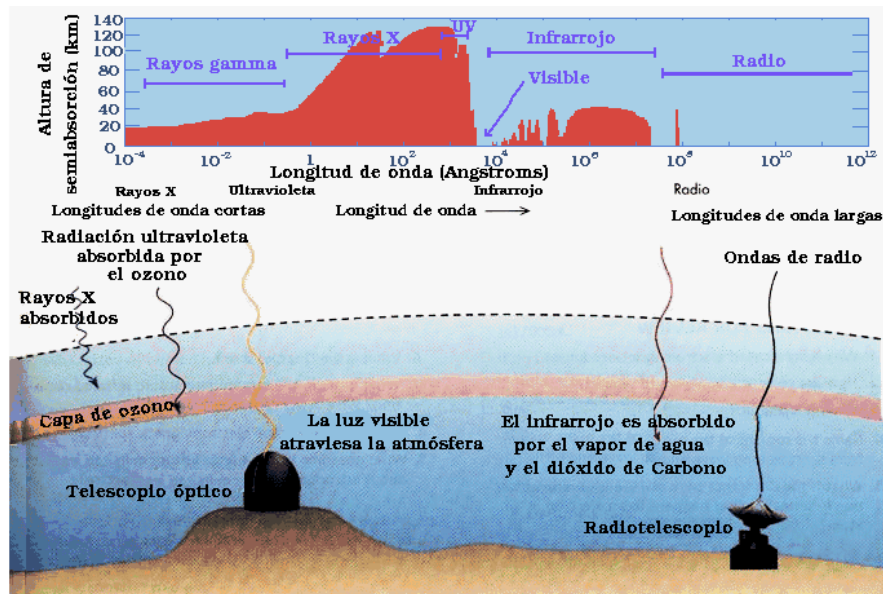


Figura 2.2: Ventanas ondas electromagnética. Tomado de: https://partner.cab.inta-csic.es/printable_section.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_2

2.2 Radiofuentes y clasificación

Las radiofuentes son todos los cuerpos celestes que tienen la característica de emitir en ondas de radio. Su clasificación puede realizarse de diversas maneras, a continuación se presenta un tipo de clasificación (Sasao y Fletcher, 2005).

- **Térmicas:** La radiación emitida por un cuerpo es específicamente en forma de calor, por ejemplo radiación de cuerpo negro.
- **No térmicas:** Radiación generada por la interacción de partículas ionizadas con campos electromagnéticos.
- **Continua:** El cuerpo celeste emite en un rango de frecuencias amplio.
- **De línea espectral:** La frecuencia en la que emite el cuerpo es específica o emite en un rango muy estrecho de frecuencia.
- **Galáctica:** Cuerpos celestes ubicados en el Vía Láctea.
- **Extra galáctica:** Cuerpos celestes ubicados fuera de la Vía Láctea.

2.3 Radiotelescopio

Un radiotelescopio es un instrumento electrónico diseñado para captar ondas de radio provenientes de cuerpos celestes como el Sol, un planeta, el centro de la galaxia, etc. En general estos sistemas están conformados principalmente por tres elementos, los cuales son: Una antena, un receptor y un sistema para visualizar la señal (software, osciloscopio, etc.).

El conjunto cuenta con una gran sensibilidad a los cambios de la señal recibida ya que estos pueden ser mínimos y casi imperceptibles, para lograrlo es posible hacer uso de algún sistema que amplifique la señal. Además puede contar con un filtro ya que el ruido en la señal adquirida puede opacar la información suministrada por el cuerpo celeste. Los diseños, formas y tamaños de los radiotelescopios varían según longitud de ondas que se recibe, para el caso particular de este trabajo, se hablará específicamente de sistemas basados en antenas reflexivas (parabólicas).

2.4 Antena reflexiva

Es un instrumento diseñado para recibir o emitir ondas electromagnéticas en el medio en que se encuentre. Para el caso de las antenas receptoras de los radiotelescopios, están diseñadas

para captar una señal electromagnética y transmitirla a un sistema de recepción. En general las señales obtenidas de cuerpos celestes por este tipo de antenas suele ser muy débil, ya que proceden de objetos que se encuentran a distancias muy grandes por ejemplo del centro de la Vía Láctea.

Existen parámetros como la ganancia y el patrón de radiación, los cuales son únicos para cada tipo de antena.

La ganancia para las antenas reflexivas está dado por la ecuación (2.4.1) (Stutzman, 1998).

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} e \quad (2.4.1)$$

Donde

A = Área de la antena

e = Eficiencia

λ = Longitud de onda

Para el caso particular de la antena reflexiva instalada en el OAUTP se cuenta con una ganancia de 37.3 dB a 11 GHz, frecuencia que está en el valor medio de funcionamiento del receptor del radiotelescopio, y teniendo como pérdida máxima de potencia 1.5 dB a 13 GHz, estos datos son asegurados por el fabricante.

2.5 Radiorreceptor

El radiorreceptor es el primer elemento en recibir la señal que entrega la antena, dependiendo de su diseño varia el rango de frecuencias de funcionamiento, además este debe introducir la menor cantidad de ruido a la señal, con el fin de tener solo datos procedentes del cuerpo celeste en estudio. En el caso particular del radiotelescopio del OAUTP se cuenta con un LNB como radiorreceptor, este recibir la señal proveniente de cuerpos celestes, que previamente es enfocada por la antena reflexiva, a partir de su plato o disco.

El radiorreceptor en su interior tiene un mezclador el cual disminuye la frecuencia en aproximadamente 10 GHz, ya que el radiotelescopio recibe frecuencias muy altas y estas no pueden procesarse directamente para su visualización o almacenamiento e incluso manipularlas o enviarlas a través de un cable puede ser una tarea inviable Figura 2.3.

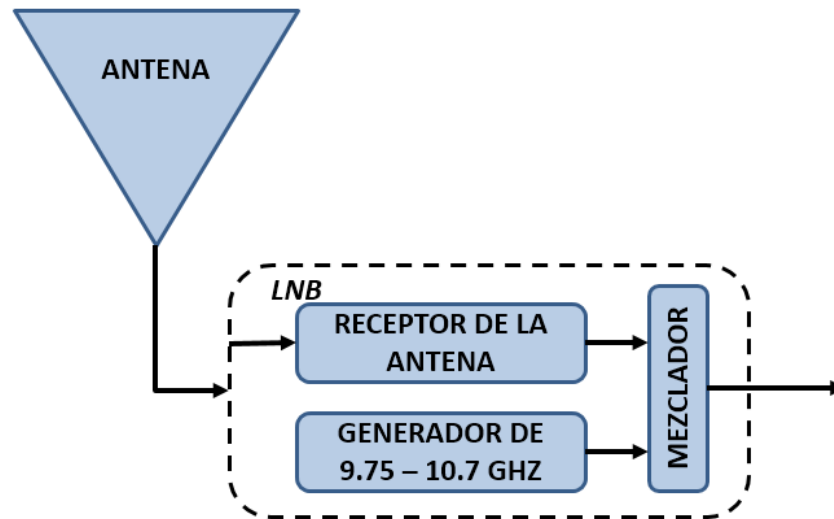


Figura 2.3: Diagrama radioreceptor.

2.6 Filtro

El filtro es el elemento del radiotelescopio encargado de seleccionar el rango de frecuencias que no serán eliminadas o atenuadas, este elemento es muy importante ya que permitirá tener una señal con menor cantidad de ruido, pero que a su vez permita visualizar la actividad del cuerpo celeste que se esté estudiando.

Para el caso del radiotelescopio desarrollado en el OAUTP, se cuenta con un filtro activo, ya que este funciona por medio de un amplificador operacional, y adicionalmente su configuración es de forma de una red Sallen-Key, el cual se caracteriza por su simplicidad, dado que pueden desarrollarse filtro pasa bajos a partir de dos resistencias, dos condensadores y un amplificador operacional. Adicionalmente en el caso de necesitar un filtro de orden superior es posible realizar una conexión en cascada (Bejarano et al., 2010) (Fanco et al., 2010).

Para realizar el filtrado de la señal del radiotelescopio es necesario limitar las frecuencias a un máximo de 500 Hz, es decir que se debe diseñar un filtro pasa bajos. En general la red Sallen-Key presenta la siguiente configuración Figura 2.4.

Pero como se mencionó anteriormente al ser un filtro pasa bajos, el diseño queda limitado a dos resistencias y dos condensadores, quedando el circuito así Figura 2.5.

Para calcular el valor de las resistencias y de los condensadores se parte de la ecuación (2.6.1), donde ya se tiene especificado que la frecuencia de corte debe ser de 500 Hz y se asume un

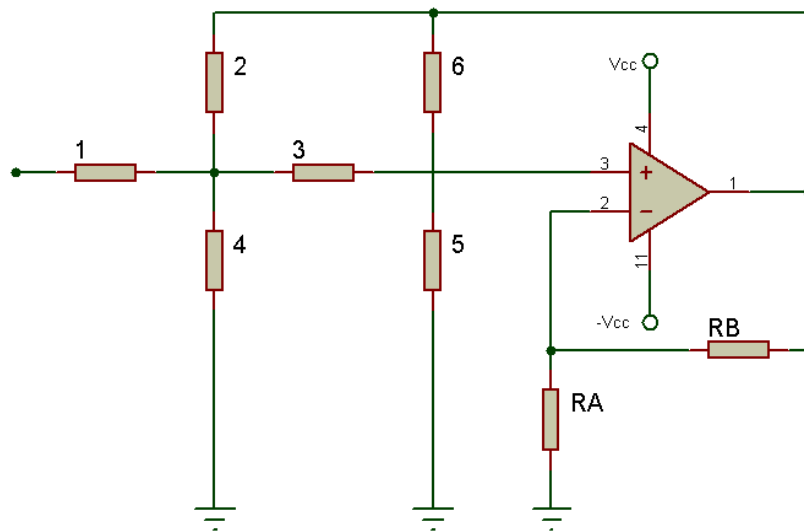


Figura 2.4: Diagrama en Proteus red Sallen-key completa.

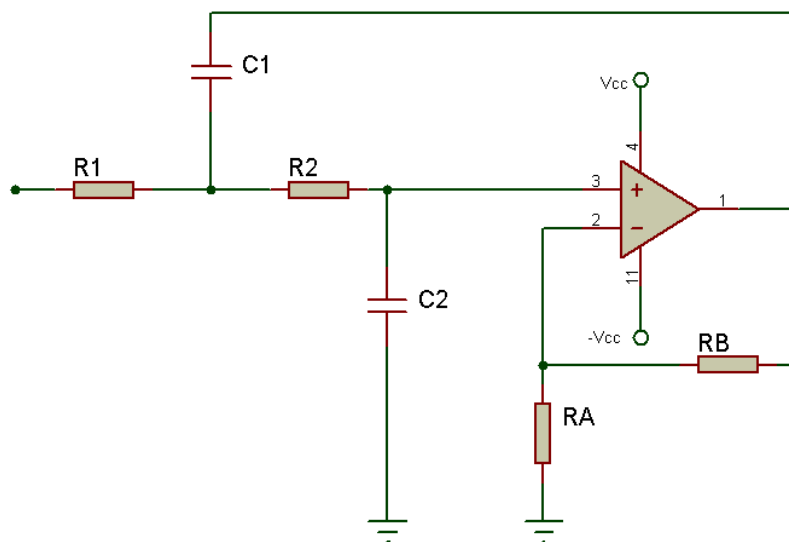


Figura 2.5: Diagrama en Proteus red Sallen-key pasa bajos.

valor de condensador de $0.001 \mu\text{F}$, por ende el valor de la resistencia es de $318 \text{ K}\omega$.

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (2.6.1)$$

Por otra parte se tiene que $R_a = 10 \text{ K}\Omega$ y $R_b = 5.8 \text{ K}\Omega$, con los que se obtiene un factor de ganancia de 1.58 a partir de la ecuación (2.6.2).

$$u = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad (2.6.2)$$

Capítulo 3

Desarrollo del Radiotelescopio

3.1 Radiotelescopio OAUTP

El diagrama de la Figura 3.1 muestra completamente el diseño del radiotelescopio. En la parte inferior se puede observar una fuente, un controlador y una montura, estos tres son encargados de permitir el posicionamiento de la antena. Esta última enfoca toda la señal recibida del cuerpo celeste en un radiorreceptor que consta de tres partes: un LNB que recibe la señal que es enfocada de la antena, seguido de el buscador de satélites descrito en la subsección 2.5, luego la señal obtenida pasa a través de un proceso de filtrado tal como se muestra en la subsección 2.6. Finalmente la señal es ingresada a una DAQ, que se encarga de muestrear la señal, para transmitir la información a una computadora que almacena y gráfica los datos registrados.

El proceso de diseño y ensamblaje del radiotelescopio de banda Ku para la observación solar, consta de seis etapas, las cuales son:

- Ensamble de antena reflexiva
- Montura
- Montaje de LNB con buscador de satélites
- Sistema de filtrado y amplificación
- Complementos
- Montaje completo

A continuación se explica cada una de las etapas de forma detallada.

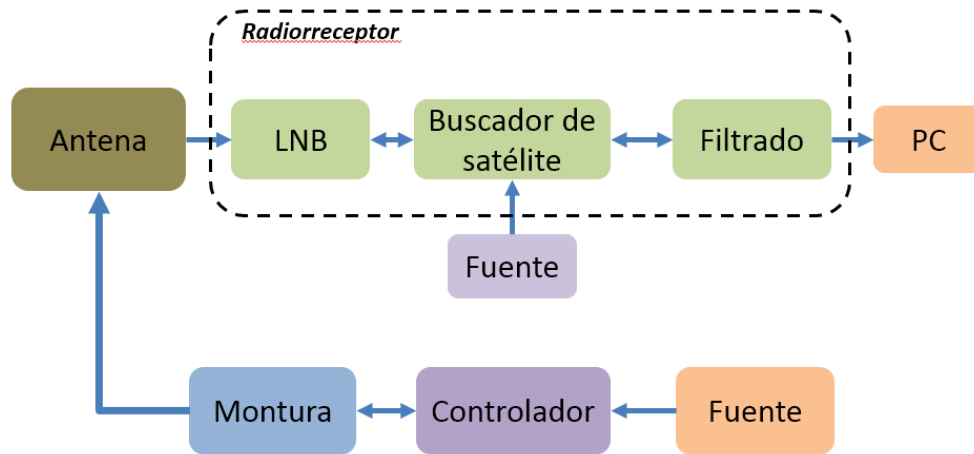


Figura 3.1: Diagrama Radiotelescopio OAUTP.

3.2 Ensamblaje de antena reflexiva

La antena parabólica con la que cuenta el radiotelescopio, es fabricada y distribuida por RF HAMDESIGN¹, con un costo de \$775.238 pesos colombianos. El diseño de la antena depende de las necesidades que esta va a solventar, ya que dependiendo de las aplicaciones o cuerpos celestes a observar, puede variar en forma o tamaño. Adicionalmente, la antena es entregada en un conjunto de piezas (ver Figura 3.2), de las cuales algunas deben ser cortadas para que encajen perfectamente sin perder su forma y concavidad específica.

Para el caso específico del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, la antena está elaborada a partir de un disco de 1.2 m de diámetro, en malla cuadriculada de 2.8 mm, esta malla debe ser cortada en forma circular y teniendo en cuenta la concavidad, puesto que si la malla se corta de forma incorrecta, obligaría a añadir un segmento y esto afectaría de manera negativa la forma en que la ondas se reflejan en la antena. A esta malla se le da concavidad por medio de una estructura de aluminio de ocho varillas radiales, las cuales llegan de forma y tamaño especificado por el comprador, por lo que no deben doblarse ni cortarse, con el fin de no perder la distancia focal del diseño que para este caso es de 0.72 m.

También se cuenta con dos aros, uno de ellos debe instalarse en la mitad del diámetro de la antena, esta pieza tiene la función de dar estabilidad a la estructura, el otro aro está ubicado en el extremo exterior del radio de la antena, es mucho más plano y rígido, esto con el fin de aumentar la superficie de contacto con la malla ya que es el único punto de anclaje de esta en el extremo y no debe zafarse independiente de las condiciones climáticas, ambos aros deben cortarse a la longitud exacta del perímetro donde estarán ubicados y no deben sobreponerse

¹<http://www.rfhamdesign.com/images/dish1.2mkit.jpg>

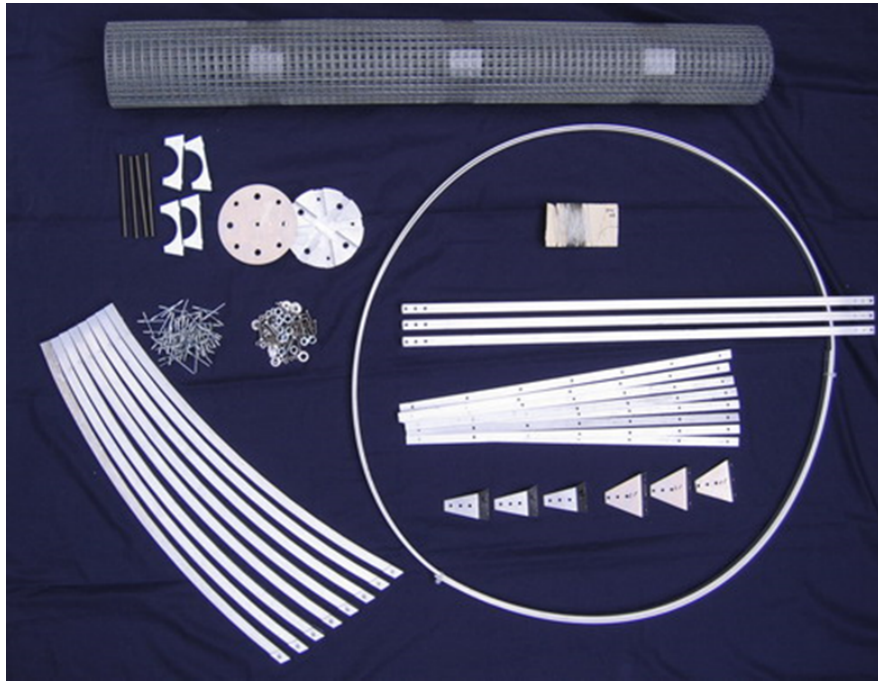


Figura 3.2: Partes que componen la antena.

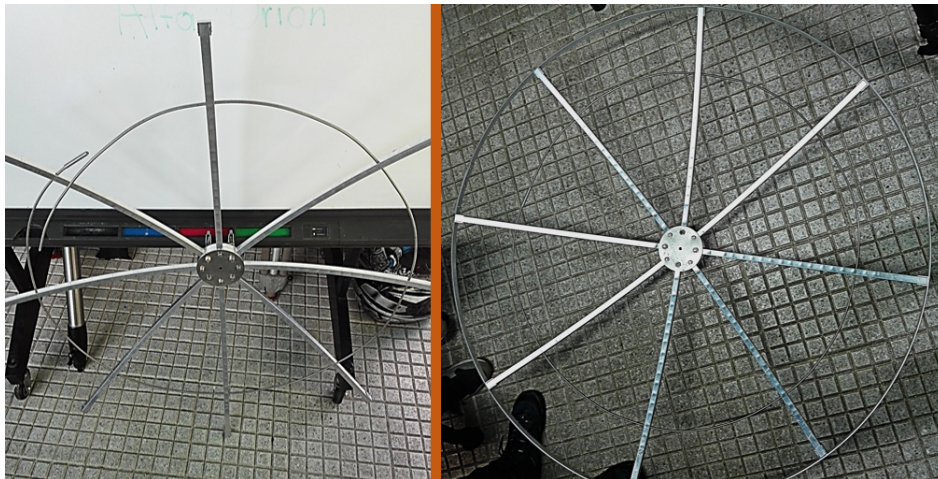


Figura 3.3: Estructura de la antena.

más de lo especificado por el fabricante (ver Figura 3.3. La estructura está conformado por la unión de las varillas radiales y dos aros, estos se unen por medio de remaches reforzados y dan toda la rigidez de la estructura, por lo que deben quedar sin ningún tipo de movimiento u holgura.

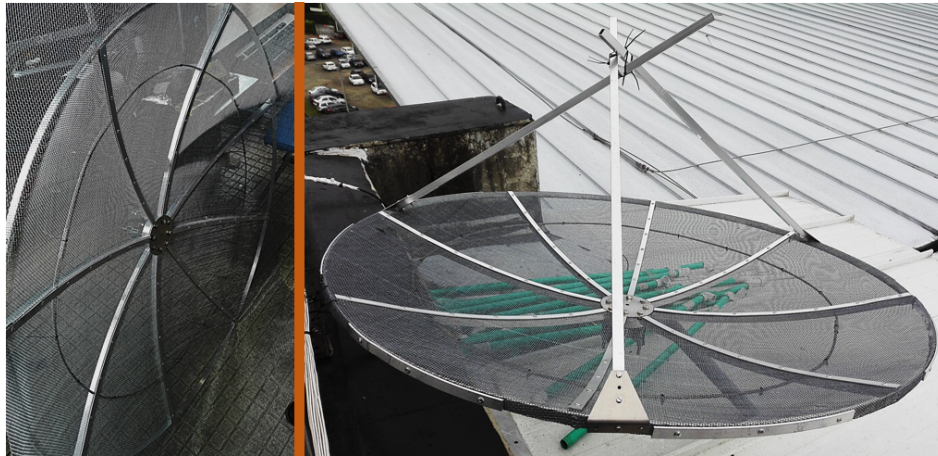


Figura 3.4: Antena completa antes y después de cortar sobrantes de malla.

Los valores específicos de diámetro, malla y distancia focal fueron seleccionados para obtener la mayor ganancia teniendo en cuenta que el sistema debe funcionar a partir de elementos presentes en la televisión satelital.

Al momento de unir la malla con la estructura es necesario recortar los pequeños sobrantes de la malla, para evitar que esta quede con protuberancias o deformaciones en el extremo, lo cual a su vez facilita la manipulación de la antena (ver Figura 3.4).

Cuando se ensambló la estructura, se aprovechó los sobrantes del aro plano del extremo para reforzar los puntos de anclaje de la malla, ya que con ellos fue posible generar secciones para colocar remaches. El ensamble de la antena se puede ver en la Figura 3.4.

3.2.1 Simulación de la antena

Haciendo uso del software 4nec2², se simuló y obtuvo el patrón de radiación de la antena, en 3D y 2D. Los resultados obtenidos se encuentran en la Figura 3.5 y 3.6, donde se puede observar un patrón direccionado al foco de la antena y un comportamiento esperado de la

²<https://www.qsl.net/4nec2/>

señal recibida, debido a su estructura en malla.

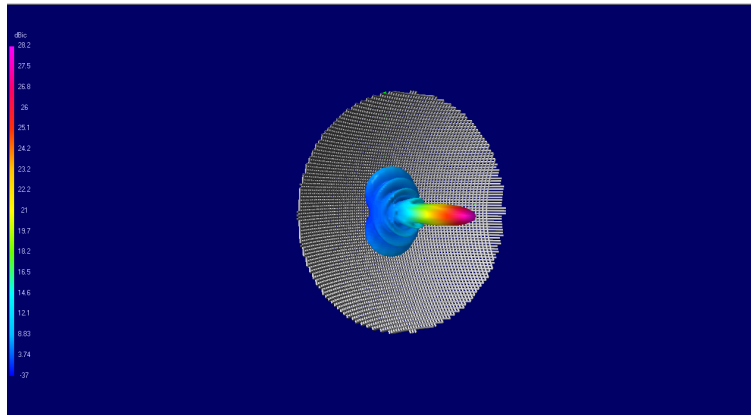


Figura 3.5: Patrón de radiación en 3D con valor de máxima ganancia.

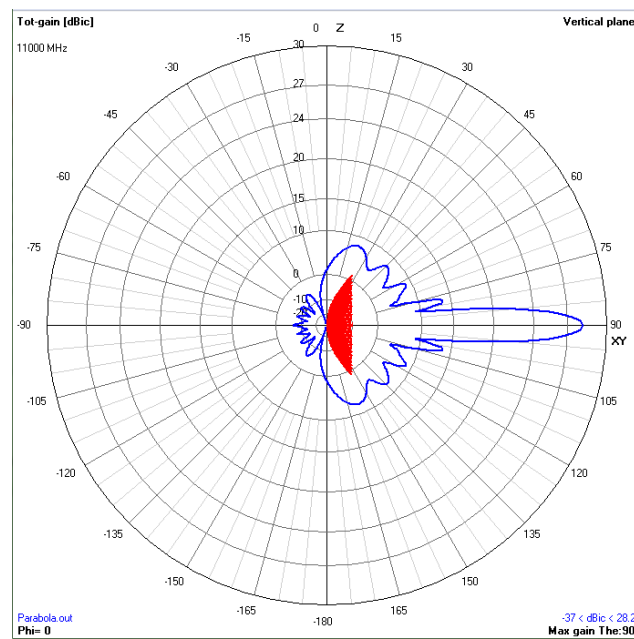


Figura 3.6: Simulación de la antena en 2D.

3.2.2 Características de la antena

A continuación se presenta la Tabla 3.1, que contiene las características de la antena.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	1,2	m
Distancia Focal	0,72	m
Cuadrícula de la malla	2,8	mm
Peso	6	Kg
Relación F/D	0,6	N/A
Frecuencia	11	GHz
Ganancia	37,3	dB
Ancho de haz	1,9	°

Tabla 3.1: Características de la antena.

3.3 Montura

La montura que se usó en el radiotelescopio de banda Ku es una SPX AX-400 (ver Figura 3.7), también fabricada y distribuida por RF HAMDESIGN³, con un costo de \$2'893.365 pesos colombianos (este precio incluye el controlador y la fuente de alimentación). Esta montura permite realizar movimientos en dos ejes, acimut y altitud, en pasos de 0.2°. A su vez este sistema cuenta con el controlador SPID MD-02 (ver Figura 3.8), que permite manipular y configurar parámetros de la montura de una manera fácil y ágil, ya que presenta en la parte frontal varios pulsadores y una pantalla LCD en la cual se pueden visualizar datos como: Cantidad de motores a usar, límites de movimiento, relación de engranajes, puesta en cero de la montura, posición en cada instante, entre otros, y todo esto sin la necesidad de acceder a un computador.

La conexión entre la montura y el controlador fue diseñada en el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira y se realiza por medio de dos cables encauchetados de 2×14 , estos son para la alimentación de los motores, y están diseñados para resistir altas temperaturas sin que esto afecte su estructura. También se utilizó un cable UTP (*Unshielded twisted pair*) de categoría 6 para la conexión de los sensores, por ellos se transmite tanto datos de posición como la alimentación eléctrica de los mismos, este tipo de cableado permite tener menor pérdida en los empalmes o uniones al igual que en la soldadura. Para su diseño se tuvo en cuenta la información de los manuales suministradas por el fabricante, como la longitud de los mismos, la cual no debe superar los 50 m, para que esto no afectara la transmisión de datos.

³<http://www.rfhamdesign.com/products/spx-antenna-rotators/index.php>

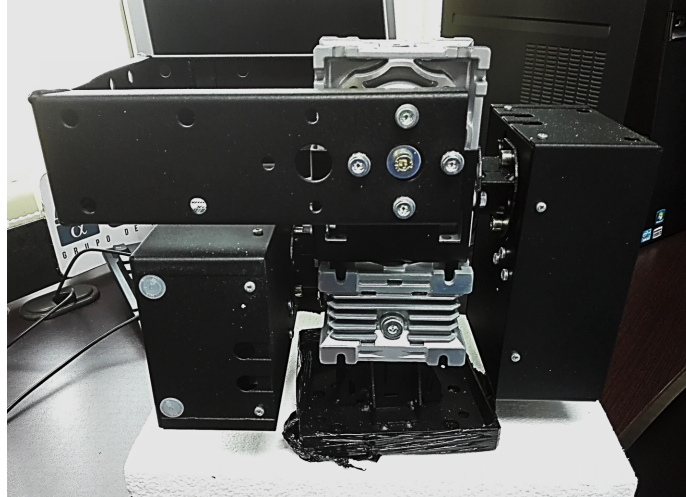


Figura 3.7: Montura de alta resolución, $0,2^\circ$.



Figura 3.8: Controlador y fuente de alimentación.

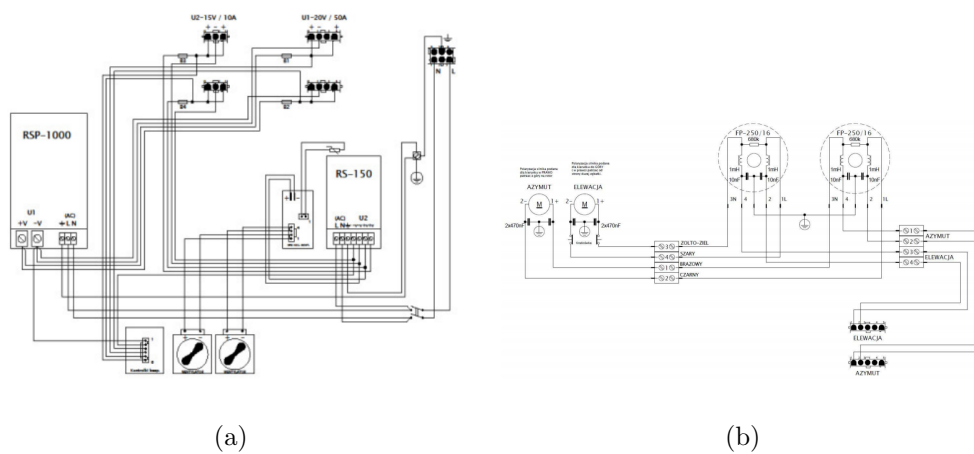


Figura 3.9: Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante, para la fuente (a) y para los motores (b).

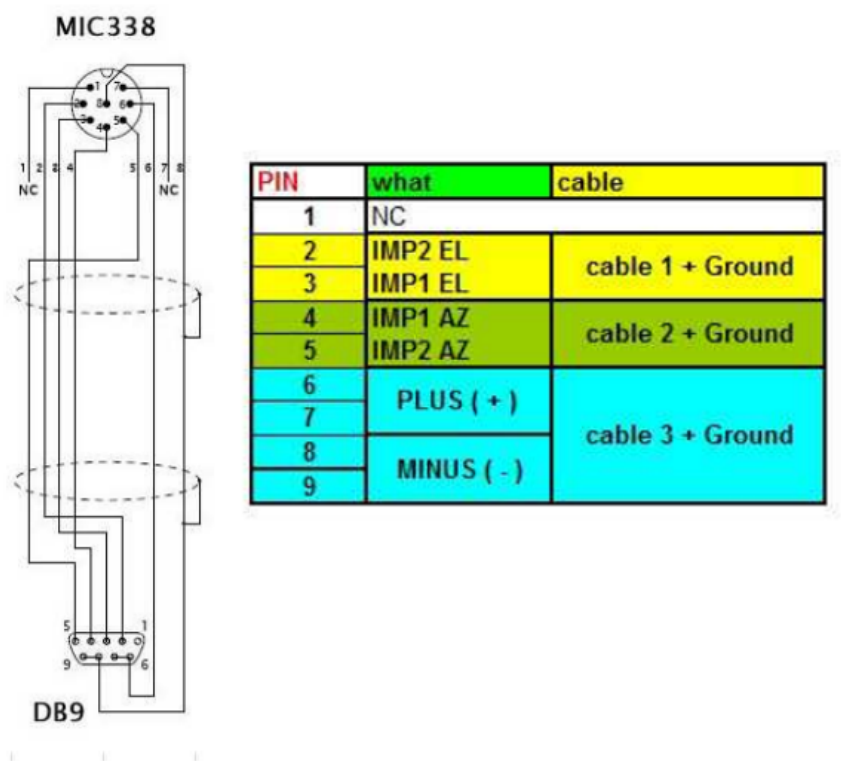


Figura 3.10: Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante, para los sensores de movimiento.

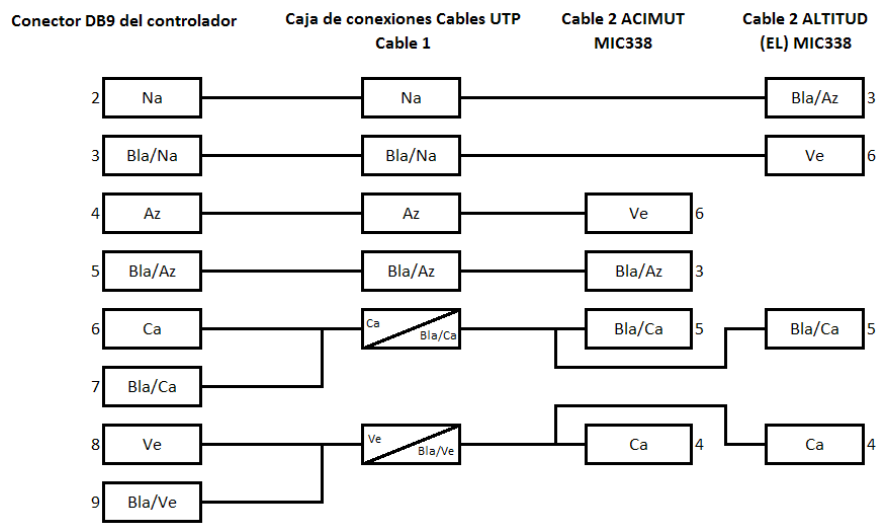


Figura 3.11: Diagrama de conexiones elaborado en el OAUTP.

Por último se cuenta con una fuente de alimentación PS-02 (ver Figura 3.8), la cual genera valores de voltaje de 13.8 V para alimentar los sensores y el controlador, y de 20-24 V para alimentar los motores de la montura. Esta fuente de alimentación va conectada directamente al controlador y de allí se distribuyen las corrientes para los demás sistemas.

Es importante realizar la verificación de los movimientos de la montura antes de instalarla, ya que esta puede girar en direcciones contrarias a lo esperado. Se aconseja llevarla a posición 0° acimut y 0° altitud, mediante el uso de los pulsadores del controlador (ver Figura 3.12). Sin embargo los valores de cero pueden ser fácilmente modificados después de la instalación como se mencionara más adelante.



Figura 3.12: Pulsadores (botones) controlador.

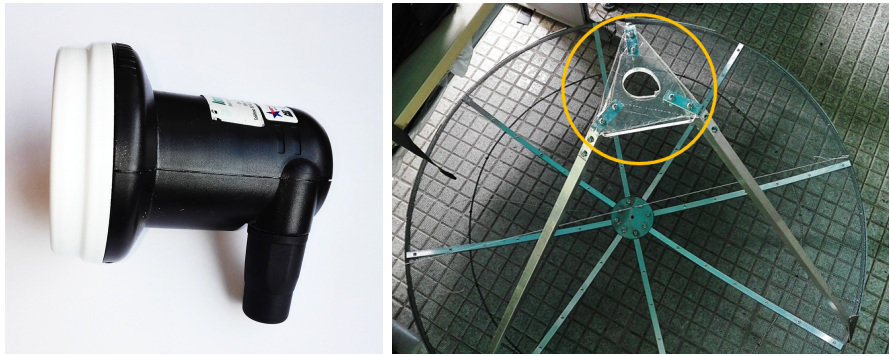
3.3.1 Características de la montura, controlador y fuente de alimentación

Parámetro	Valor	Unidades
Rango de movimiento acimut	0 – 360	$^\circ$
Rango de movimiento altitud	0 – 180	$^\circ$
Resolución de movimiento	0,2	$^\circ$
Voltaje de la fuente	110	V
Voltaje de motores	24	V
Voltaje de sensores	15	V
Corriente máxima	40	A
Puertos USB	1	N/A

Tabla 3.2: Características de la antena.

3.4 Montaje de LNB con buscador de satélites

El LNB que se uso es un PLL321S-2⁴ (ver Figura 3.13 (a)), que tiene un costo de \$74.827 pesos colombianos, éste debe estar instalado justo en el foco de la antena para obtener la mayor ganancia. En las piezas de la antena se incluyen tres brazos rectos, los cuales tienen una longitud cercana a la distancia focal, estos se deben instalar equidistantes en el perímetro de la antena, pero por cuestiones de diseño es necesario desplazarlos un poco, ya que de lo contrario el remache de sujeción no se puede instalar, por esta razón es necesario diseñar una base en acrílico la cual tiene en cuenta estas variaciones en las distancias y permite ubicar el LNB en el punto focal exactamente. Dicha base tiene la forma de un triángulo escaleno, ya que los brazos no están equidistantes, pero el LNB debe quedar completamente centrado para obtener la mayor ganancia. Adicionalmente los brazos tenían mayor longitud que la distancia focal, por lo que en principio se pensó en cortarlos a una menor medida, pero finalmente se tomó la decisión de no hacerlo hasta realizar pruebas de señal, ya que añadir una sección a cada uno de los brazos sería demasiado complejo y se podría generar una desalineación en la estructura que soporta el LNB. Por último la base de acrílico permite realizar un ajuste fino (pequeños desplazamientos) en la distancia focal y obtener de esta manera la mayor ganancia del sistema (ver Figura 3.13 (b)).



(a) LNB

(b) Base de acrílico

Figura 3.13: Montaje del LNB en la antena.

El LNB se conecta directamente por medio de un cable coaxial a el buscador de satélites (ver Figura 3.14 (a)), el cual tiene un costo de \$69.071 pesos colombianos, este último cuenta con un galvanómetro (escala análoga con aguja), el cual muestra la intensidad de la señal recibida del LNB en todo momento en la escala, este sistema también cuenta con un amplificador en dB de la señal, para facilitar la observación de señales de baja intensidad.

⁴<http://www.dmsiusa.com/ku-universal-lnbf.php>



Figura 3.14: Imagen frontal (a) y posterior (b) del buscador.

3.4.1 Características del LNB

Parámetro	Valor	Unidades
Rango de frecuencias de entrada	10.7– 12.75	GHz
Rango de frecuencias de salida	950 – 2150	MHz
Rango F/D	0,5 – 0,7	N/A
Valor de ruido	0,1	dB
Ganancia	60	dB
Temperatura de operación	-40 – +60	°C

Tabla 3.3: Características de funcionamiento del LNB.

3.4.2 Características del buscador de satélites

Parámetro	Valor	Unidades
Frecuencias de operación	950–2250	MHz
Voltaje de funcionamiento	13 o 18	V
Selector polarización	horizontal o vertical	N/A

Tabla 3.4: Características de funcionamiento del buscador de satélites.

3.5 Sistema de filtrado y amplificación

Para filtrar la señal proveniente del buscador de satélites se usó una red Sallen-key, la cual consiste en un filtro electrónico caracterizado por su simplicidad de diseño. Este sistema cuenta con dos resistencias de 330 k Ω , dos condensadores 0.001 μ f y un amplificador TL084, los cuales son los encargados de otorgar las características de funcionamiento al sistema (ver Figura 2.5). La función de transferencia que describe el comportamiento del filtro se puede observar en la ecuación 3.5.1, así como el diagrama de bode realizado a por medio de MATLAB mostrado en la Figura 3.15

Para el caso del sistema diseñado en el OAUTP, el sistema cuenta con una frecuencia de corte de 500 Hz, ya que la señal de entrada al filtro, se toma directamente del galvanómetro presente en el buscador de satélites, y este presentará variaciones mucho más bajas en frecuencia que la señal recibida directamente del LNB. Después de tener el diseño del filtro se pasa a el montaje del mismo, este está montado en una protoboard, ya que facilita la manipulación y cambio de las piezas de una manera práctica y ágil (ver Figura 3.16).

La conexión del buscador de satélites al filtro se realiza por medio de dos cables que se encuentran en la parte posterior del buscador, uno de ellos es naranja, que corresponde a la tierra y el otro es azul, que corresponde a la señal del galvanómetro. El cable naranja debe conectarse a la tierra “GND”, y el azul a la entrada del filtro “input”, que se pueden ver en la Figura 3.16.

$$G(s) = \frac{9.87 * 10^6}{s^2 + 4462s + 9.87 * 10^6} \quad (3.5.1)$$

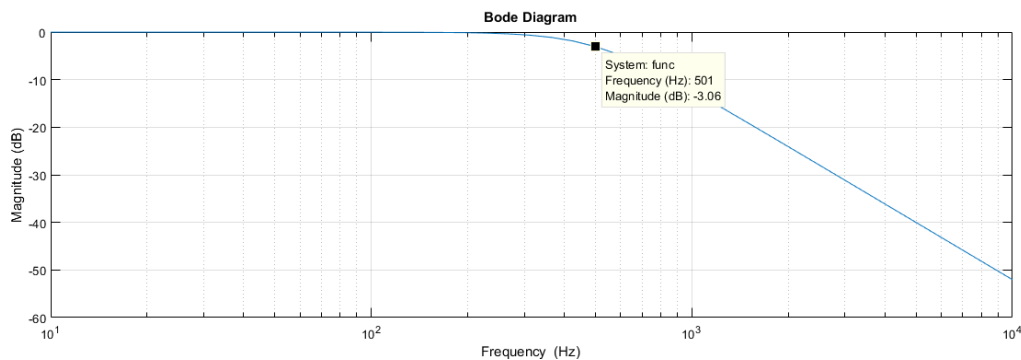


Figura 3.15: Diagrama de Bode en MATLAB.

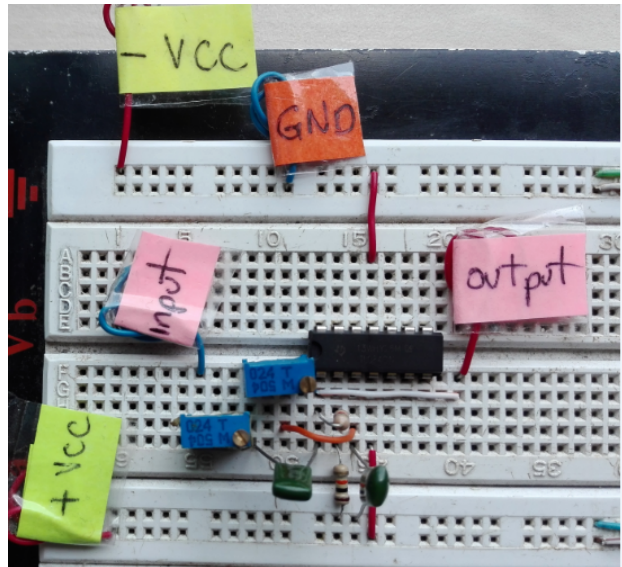


Figura 3.16: Montaje del filtro en Protoboard.

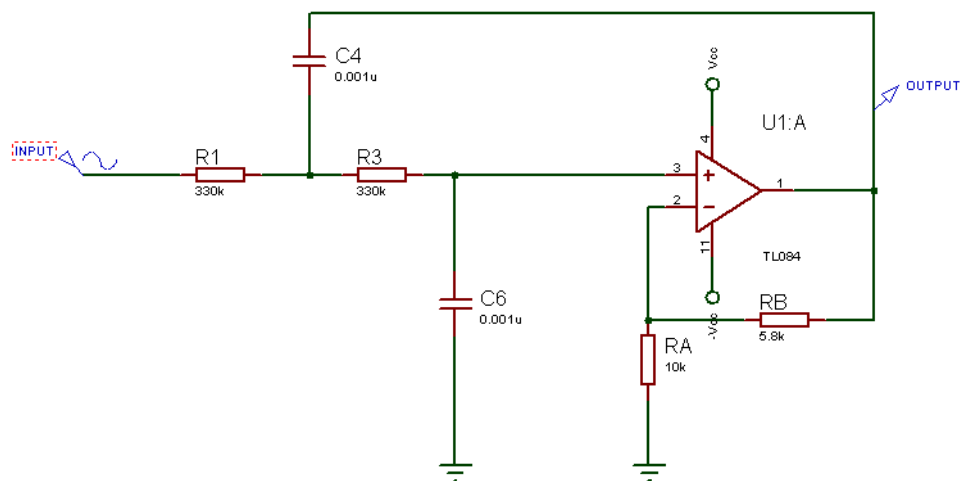


Figura 3.17: Simulación del filtro en Proteus.

3.6 Complementos

Para realizar el montaje final del radiotelescopio es necesario contar con tres elementos adicionales, los cuales fueron diseñados y fabricados bajo los requerimientos específicos para funcionar en el observatorio de la UTP. El primer elemento consiste en una base de 1 m de altura (ver Figura 3.18), la cual eleva todo el sistema con la finalidad de evitar el roce con elementos adyacentes o la misma columna donde está instalado el radiotelescopio y también mejora el campo de visión ya que se gana altura, a su vez está elaborada en ángulo de hierro, para dar mayor estabilidad y solides a el radiotelescopio durante su manipulación y movimiento, que adicionalmente da rigidez para contrarrestar las condiciones climatológicas de la región.



Figura 3.18: Base en ángulo de Hierro.

El segundo elemento es una fuente de alimentación independiente para el sistema de LNB y buscador de satélite, la cual debe generar 18 V en DC (ver Figura 3.19), fabricado a partir de un adaptador de 24 V y 1 A, un regulador de tensión LM7818, dos condensadores de 100 μf y dos conectores de bornes de 5 mm. Este regulador de tensión simula la alimentación que genera un receptor de televisión (ya que este elemento es innecesario en el montaje) y

por tanto se conecta por medio de un cable coaxial al buscador de satélites y este a su vez alimenta eléctricamente al LNB.

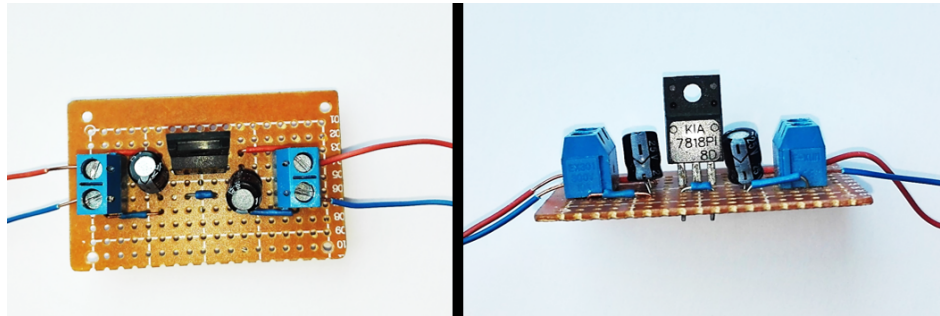


Figura 3.19: Fuente 18 Volts.

El tercero es una caja de conexiones ubicada en la mitad de la base de hierro, en esta caja se conecta la alimentación de los dos motores, conexión de sensores con su alimentación y el cable coaxial proveniente del LNB (ver Figura 3.20). La función de este elemento es proteger el radiotelescopio en caso de salirse de control, ya que si esto llega a suceder se desconectaría de una manera muy rápida y sencilla sin afectar la estructura, o generar un daño en algún elemento, además facilita el desarme de la montura o el radorreceptor en caso de ser necesario algún tipo de mantenimiento. Esta caja es a prueba de agua, y todos los acoples que llegan a ella están pensados para no generar acumulación de agua.

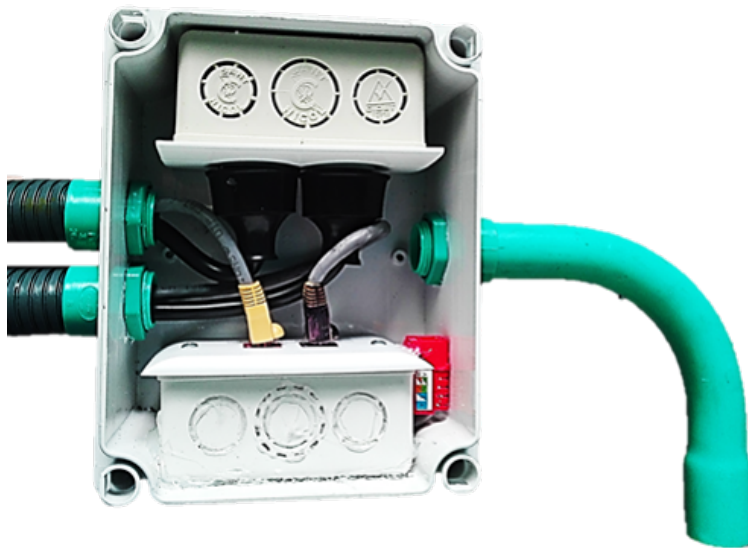


Figura 3.20: Caja de conexiones principales.

3.7 Montaje completo

Después de tener listas cada una de las partes mencionadas en los numerales anteriores, se realiza un ensamblaje de antena, montura y LNB (ver Figura 3.21), para revisar el movimiento y la alineación de los mismos, ya que esta estructura está en la cima de una columna en un séptimo piso, por lo que pensar en ensamblar o alinear la montura desde este punto y de manera manual no es una tarea viable, ni segura.



Figura 3.21: Montaje parcial.

Con el radiotelescopio ensamblado se procede a instalar la base de hierro en la cima de la columna. Para dar mayor anclaje pero sin afectar la estructura de la columna se usaron chasos expansivos para concreto de seis pulgadas.

El radiotelescopio finalmente se instaló en la cima de la base de hierro, como se puede ver en la Figura 3.22, y a su vez se instalaron tres alambres trenzados con su respectivo arnés, los cuales dan seguridad a la estructura, ya que como se mencionó anteriormente está en la cima de una columna en un séptimo piso. En este punto el montaje está terminado y listo para entrar en funcionamiento.



Figura 3.22: Montaje final.

Capítulo 4

Funcionamiento

4.1 Puesta a punto

Para la puesta a punto del radiotelescopio, se deben llevar a cabo en principio dos configuraciones independientes, una para la antena y otra de la montura, y finalmente trabajar con el radiotelescopio como una unidad y verificar el funcionamiento de los elementos restantes.

- Se comienza realizando la configuración de la montura y el controlador. Dado que este último está diseñado para trabajar con diferentes monturas, es necesario especificarle con cuantos motores se cuenta y a su vez configurar el paso (o relación) de los engranajes de la misma, esto se logra ingresando a la configuración del controlador así:
 - Para seleccionar el tipo de motores:
 1. Ingresar al menú por haciendo uso del pulsador **S** ver Figura 3.12 en el controlador.
 2. Mediante las flechas izquierda y derecha llegar a **MOTOR CONFIGURATION**, se selecciona esta opción de nuevo con el pulsador **S**.
 3. Se seleccionan la opción **1:AZ**, **2:EL**, en **TEMPLATE** ver Figura 4.1 con las flechas de dirección arriba y abajo.
 4. Para regresar un paso en el menú se usa el pulsador **S** y para salir se pulsa **F**, siempre al intentar salir pregunta si se desea guardar.
 - Para modificar la relación de los engranajes de movimiento:
 1. Ingresar al menú haciendo uso del pulsador **S** en el controlador.
 2. Mediante las flechas izquierda y derecha llegar a **SET MOTOR 1**, se selecciona esta opción de nuevo con el pulsador **S**.

3. De nuevo mediante las flechas izquierda y derecha llegar a **GEAR: 0.1890** ver Figura 4.1, si muestra un valor distinto, se hace uso de las flechas de dirección arriba y abajo para cambiar el valor.
4. De nuevo para salir se pulsa **F**.



Figura 4.1: Configuración de motores en la montura y configuración de la relación de engranajes.

Estas configuración permiten tener movimiento en acimut y altitud con alta resolución, es decir, con un paso mínimo de 0.2° . La montura cuenta con dos sensores de movimiento, uno para cada motor, estos entregan la posición de la montura en cada instante de tiempo, y se puede visualizar en la pantalla del controlador como se ve en la Figura 4.2. El controlador también cuenta con un conjunto de botones para realizar la selección y configuración en cada uno de los apartados que este comprende (ver Figura 3.12).



Figura 4.2: Pantalla controlador.

Recordando que el pulsador **S** se usa para ingresar al menú de configuración del controlador, en este apartado también se puede configurar la conexión con el computador, el uso de ratón (en caso de ser necesario) y la conexión a Internet. El pulsador **F** se usa para entrar en el apartado de alineación o “modo ángulo” y a su vez permite finalizar y salir cuando de está dentro del menú.

Al ingresar al apartado de alineación (pulsador **F**) es posible especificarle a la montura la dirección a la cual está apuntando haciendo uso de las flechas de dirección izquierda y derecha, para salir del modo ángulo se presiona de nuevo el pulsador **F**. Por medio

de este apartado se realizan los cambios en la alineación fácilmente, partiendo de un objeto de posición conocida.

Para el ajuste fino en la alineación de la montura es necesario contar con una brújula (para la alineación en acimut) y de un nivel (para la alineación en altitud). Con estos dos instrumentos es posible tener una certeza de estar en la posición inicial, 0° acimut y 0° altitud ($0^\circ - 0^\circ$), lo cual da paso a las pruebas de movimiento. Se verificó la estabilidad de la estructura, y el conteo (o medición) de los ángulos al desplazarse, en este punto se visualizó un problema ya que al manipular el radiotelescopio por largos periodos de tiempo, este perdía la alineación, por lo que se procedió a buscar el valor de la relación de los engranajes, encontrando como mejores resultados 0.1890, ya que el dado por el fabricante de 0.1875 no se ajustaba a lo establecido, para cambiar este valor se ingresa a la configuración de cada uno de los motores y se va al apartado **GEAR**, allí se ingresa el valor. Para esta tarea se tomaron medidas a diferentes ángulos y con esto se generó un valor promedio para tener la mayor precisión tanto en ángulos pequeños ($0^\circ - 45^\circ$), como en ángulos mucho mayores (150° en adelante).

- El ajuste correspondiente a la antena y el LNB debe realizarse después de tener una alineación de la montura, ya que es necesario apuntar a un satélite artificial, porque estos mantienen una posición constante y su señal tiene una intensidad lo suficientemente alta como para distinguirlos con facilidad en la escala del galvanómetro (ya que justamente para eso está diseñado).

Después de apuntar a un satélite artificial y encontrar la orientación con mayor ganancia, se procede a variar la distancia focal del LNB, buscando el punto en donde la ganancia es aún un poco mayor (recordando que el LNB también tiene una distancia focal). Después de hallar la distancia, se procede a fijar la posición del LNB, por medio de un par de abrazaderas plásticas como se puede ver en la Figura 4.3, pero de una manera que permita realizar cambios o mantenimiento.

Para finalizar la puesta a punto se realiza una verificación por medio de la recepción de señal de diversos satélites artificiales, confirmando de esta manera que la señal recibida tiene la intensidad necesaria para visualizarse, además se verifica la alineación por medio del posicionamiento de los satélites conocidos, y el Sol, aunque este último puede llegar a generar confusión ya que está en constante movimiento en la bóveda celeste.

Nota: En este punto es importante recordar que tanto el LNB como el Buscador de satélites son instrumentos diseñados para captar señales de satélites artificiales de televisión, y por



Figura 4.3: LNB instalado en la base de acrílico.

tanto es necesario realizar modificaciones en ello, como lo fue tomar la señal directamente del galvanómetro o diseñar una fuente para alimentar el LNB con el buscador de satélites (ya que esta función la realiza un decodificador o receptor de televisión), con el fin de visualizar información procedente de cuerpos celestes.

4.2 Ajuste galvanómetro

Para tomar la señal procedente del buscador de satélites, se tiene dos cables en la parte posterior del buscador, uno azul conectado a la parte positiva del galvanómetro y otro naranja conectado a la parte negativa del mismo (ver Figura (b) 3.14), de esta manera se trabaja con una señal de menor frecuencia, comparada con la procedente del LNB, pero que presenta el mismo comportamiento en cuanto a los cambios de intensidad, por tanto al momento de medir las variaciones en la señal procedente del Sol esta se verá reflejado en la escala del galvanómetro (ver Figura (a) 3.14). Estos dos cables deben conectarse al filtro, el naranja a **GND** del filtro y el azul a **input**, de esta manera la señal del buscador es filtrada.

4.3 Conexión DAQ y adquisición de datos

Se toma la señal de salida del filtro **output** (ver Figura 3.16) y se conecta al pin análogo 0+ de la DAQ. Ahora del mismo filtro se conecta **GND** al pin análogo 0−, debe realizarse

un puente en la DAQ para conectar el pin análogo 0– con el pin AGND, como se puede ver en la Figura 4.4. Por último se conecta la DAQ a una computadora por medio del cable USB.

4.3.1 Adquisición de datos

Para la toma, visualización y almacenamiento de los datos se hace uso de un código en MATLAB, éste recibe la información por medio de la DAQ, la gráfica y permite guardarla. El código es el siguiente:

```
format longg
close all
devices = daq.getDevices
s = daq.createSession('ni');
addAnalogInputChannel(s,'myDAQ1', 0, 'Voltage');
s.Rate = 500;
ini = datestr(now);
data = s.inputSingleScan;
[data,time] = s.startForeground;
s.DurationInSeconds = 5*60; % minutos de la toma de datos
s;
[data,time] = s.startForeground;
plot(time,data);
xlabel('Time (secs)');
ylabel('Voltage');
fin = datestr(now);

hora = str2double(ini(13:14));
min = str2double(ini(16:17));
seg = str2double(ini(19:20));
SegInicio = hora*3600 + min*60 + seg;

horaf = str2double(fin(13:14));
minf = str2double(fin(16:17));
segf = str2double(fin(19:20));

SegFinal = horaf*3600 + minf*60 + segf;
timevec = SegInicio:(SegFinal-SegInicio)/4:SegFinal';
```

```

lab = [];
for i = 1:length(timevec)
    horam = floor(timevec(i)/3600);
    minm = floor((timevec(i)/3600 - horam)*60);
    seg = floor(((timevec(i)/3600 - horam)*60-minm)*60);
    lab = char(lab, strcat(num2str(horam),':',num2str(minm),':', num2str(seg)));
end
lab = lab(2:end,:); %se elimina el prime datos vacio

plot(time,data)
set(gca,'XTick', time(1):(time(end)-time(1))/4:time(end),'XTickLabel',lab)
ylabel('Voltage $(V)$','FontUnits','points','interpreter',...
'latex', 'FontSize',17,'FontName','Times')
xlabel('time $(hh:mm:ss)$','FontUnits','points','interpreter',...
'latex', 'FontSize',17, 'FontName','Times')

```

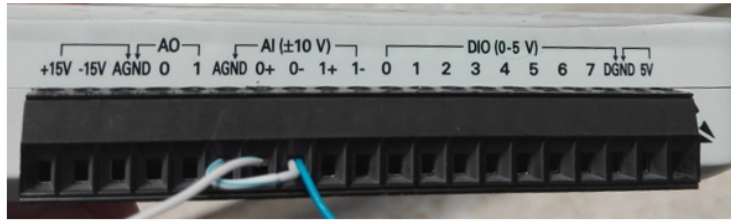


Figura 4.4: Pines de conexión DAQ.

4.4 Seguimiento con el radiotelescopio

Dadas las características del controlador MD-02, es posible utilizar algún software adicional para realizar seguimiento, en este caso se utiliza el Orbitron¹, el cual cuenta con un catálogo amplio de satélites artificiales, así como el Sol y la Luna. Este software utiliza un driver que permite la comunicación entre controlador y Orbitron, el cual es proporcionado por los mismos diseñadores.

Para realizar el seguimiento, primero se lleva a cabo un protocolo que permite la comunicación entre los dos software (spid MD-01 y Orbitron), cuyo primer paso es abrir ambos programas, después se ingresa al Orbitron y se accede a la pestaña “Rotor/Radio”, donde

¹<http://www.stoff.pl/>

se selecciona como objeto el Sol, por último se da clic a la derecha del driver (el cual debe tener seleccionado el “MyDDE”) como se puede ver en la Figura 4.5, en es instante se abre la ventana My DDE indicando que el Orbitron está listo para realizar seguimiento (ver Figura 4.6), al cerrar esta ventana se estaría cancelando la actividad.

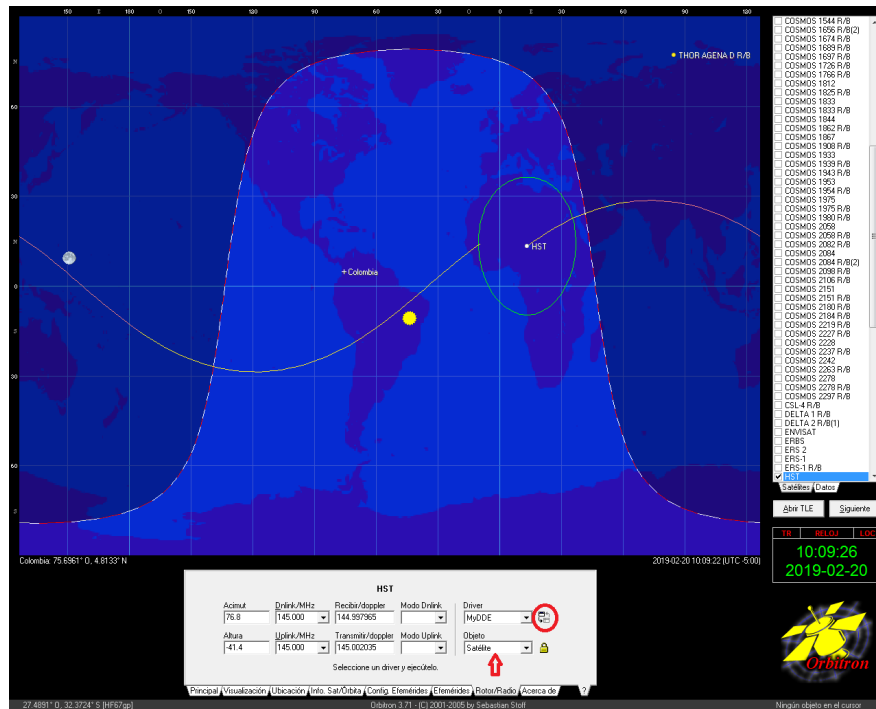


Figura 4.5: Programa para el seguimiento. Orbitron.

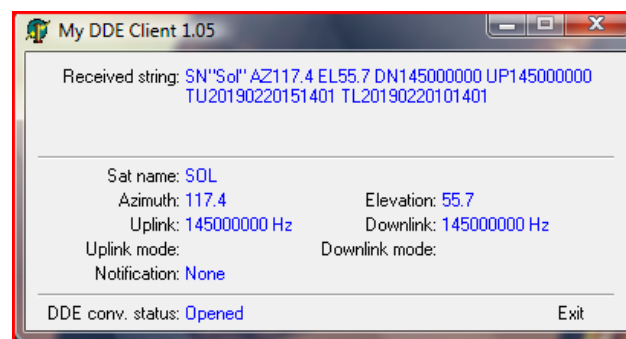


Figura 4.6: Ventana de información suministrada para el seguimiento. My DDE.

Ahora se ingresa al programa spid MD-01 y se accede a la pestaña “ORBITRON”, desde este punto es posible activar la comunicación para el seguimiento, dando doble clic en “DDE conv. status: close” (ver Figura 4.7).



Figura 4.7: Software del controlador, configuración para seguimiento.

Para finalizar la comunicación del Orbitron con el spid MD–01, es suficiente con dar clic en el botón **S** en la ventana del spid MD–01 (ver Figura 4.7) y seguidamente dar doble clic en “DDE conv. status:” para que quede en “Closed”, siempre verificando que la montura no siga en movimiento ya que podría ocasionar un daño en el cableado de la misma.

Si se desea regresar a una posición específica es suficiente con ingresarlas en las casillas **M1** y **M2** ventana del spid MD–01 y oprimir **Send**.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Costos

Para llevar a acabo este proyecto el OAUTP adquirió varios instrumentos e insumos, los cuales fueron subsidiados por la Universidad Tecnológica de Pereira. Estos elementos están condensados en la Tabla 5.1.

Articulo	Costo \$ COP	Financiación
Antena parabólica en malla de 1.2m	775.238,29	UTP
Montura HD Acimut y Altitud incluye control	2'893.365,30	UTP
LNB	74.827,17	UTP
Buscador de satélite	69.071,24	UTP
Sistema de alimentación	16.000	UTP
Cableado	150.000	UTP

Tabla 5.1: Tabla de presupuestos del proyecto en pesos colombianos.

Si se compara el precio total con respecto a un radiotelescopio a la venta en el mercado^{1,2}, se observa lo económico del proyecto, ya que estos pueden oscilar valores de \$ 20.000 dolares.

5.2 Transito del Sol

Las primeras tomas de datos se realizaron a satélites artificiales de televisión como se mencionó anteriormente, ya que se encuentra en posiciones fijas, permitiendo verificar fácilmente

¹<https://telescopes.net/store/telescopes/telescopes/radio-astronomy/primaluce-lab-spider-230c-compact-radio-telescope.html>

²<https://www.radio2space.com/>

la alineación del radiotelescopio (sin tener que mirar en la posición $0^\circ - 0^\circ$), puesto que si el satélite se desplaza, cambiando su posición con el paso del tiempo, indica que el radiotelescopio está perdiendo la alineación al momento de ser usado. Al medir distintos satélites artificiales se observó que algunos presentan una menor ganancia y esta puede disminuir un poco con climas adversos, pero en la mayoría de los casos se observa que la aguja del galvanómetro aumenta hasta un valor entre 7 y 8 (en la escala que este maneja) y además no varía independiente del clima.

Posteriormente se realizan mediciones del ruido presente en la señal del galvanómetro (buscador de satélites) por medio de un osciloscopio, esto apuntando a un satélite artificial, y se hizo una comparación directa del comportamiento de la señal con y sin el filtro, recordando que este último presenta una frecuencia de corte de 500 Hz. El comportamiento del ruido en la señal se puede observar en la Figura 5.1, donde la gráfica roja muestra la señal sin filtrarse y en la gráfica azul una señal filtrada, en la cual se puede notar que el ruido correspondiente a las altas frecuencias es eliminado, pero sus componentes de bajas frecuencias si son recibidas, en este punto es importante recordar que los cambios de intensidad del Sol pueden ser cortos, por lo que tener un filtro a una menor frecuencia dejaría por fuera pequeños cambios en la señal que pueden estar relacionados con flujo de partículas cargadas.

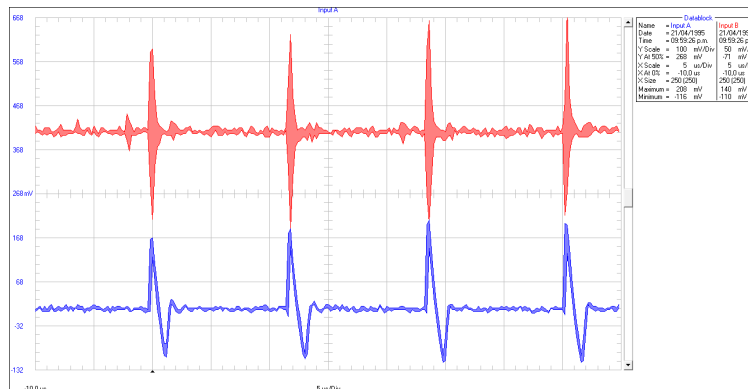


Figura 5.1: Imagen osciloscopio antes y después del filtro.

Posteriormente se realiza una medición de un cuerpo celeste, que para nuestro caso es el Sol, se realizaron tomas con y sin filtro para visualizar las diferencias de la señal entregada por el galvanómetro, pero procesando la información por medio de la DAQ y MATLAB y se obtuvieron los resultados de la Figura 5.2. Donde se puede visualizar como al filtrar la señal se eliminan las altas frecuencias, pero a su vez se facilita la observación de las variaciones en la intensidad de la señal.

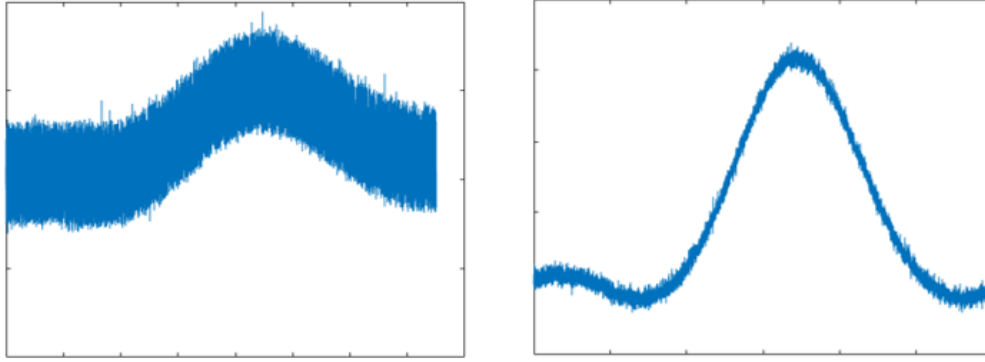


Figura 5.2: Toma de datos del Sol con y sin filtro.

En general los datos tomados por el radiotelescopio presentan un rango de funcionamiento entre 120 mV y 180 mV es decir que presenta oscilaciones en el voltaje de 60 mV aproximadamente, es de aclarar que los valores máximos y mínimos presentes en las gráficas son dependientes de la ganancia que se le dé al sistema por medio de la perilla del galvanómetro.

A su vez el rango de 60 mV puede variar un poco si el clima presenta condiciones de lluvia fuerte, ya que la densidad de las nubes y las altas cantidades de partículas de agua, genera una barrera para las ondas electromagnéticas de banda Ku que se dirigen a la antena, además la acumulación de agua en la misma genera variaciones en su área efectiva.

El método que se utilizó para tomar datos del Sol se denomina tránsito, el cual consiste en direccionar la antena a un punto en el cielo por el que el cuerpo celeste va a cruzar, y se comienza la toma de datos unos minutos antes de comenzar a pasar en frente de la antena y hasta que este salga del campo visual de la misma. Como este método tarda unos 25 minutos aproximadamente, no es posible visualizarlo con el osciloscopio (no de forma completa), por esto se hizo uso de una DAQ para la adquisición de los datos y a su vez para realizar una visualización de una forma directa, haciendo uso de un programa creado en MATLAB.

Se realizaron diversas tomas de datos, intentando abarcar diferentes condiciones climatológicas, desde lluvias, hasta un clima despejado. La Figura 5.3 (a) corresponde a un tránsito tomado en condiciones de lluvias y alta nubosidad, como se puede notar la intensidad es aproximadamente 10 mV menor a las demás, pero en general los datos presentan una alta variación con respecto a la intensidad recibida, confirmado que el sistema funciona de una manera eficiente independiente de las condiciones climatológicas.

La Figura 5.3 (b) y 5.3 (c) corresponden a datos tomados con un clima despejado y su comportamiento es estable y no presenta cambios u alteraciones atípicas que puedan indicar un

mal funcionamiento por parte del sistema.

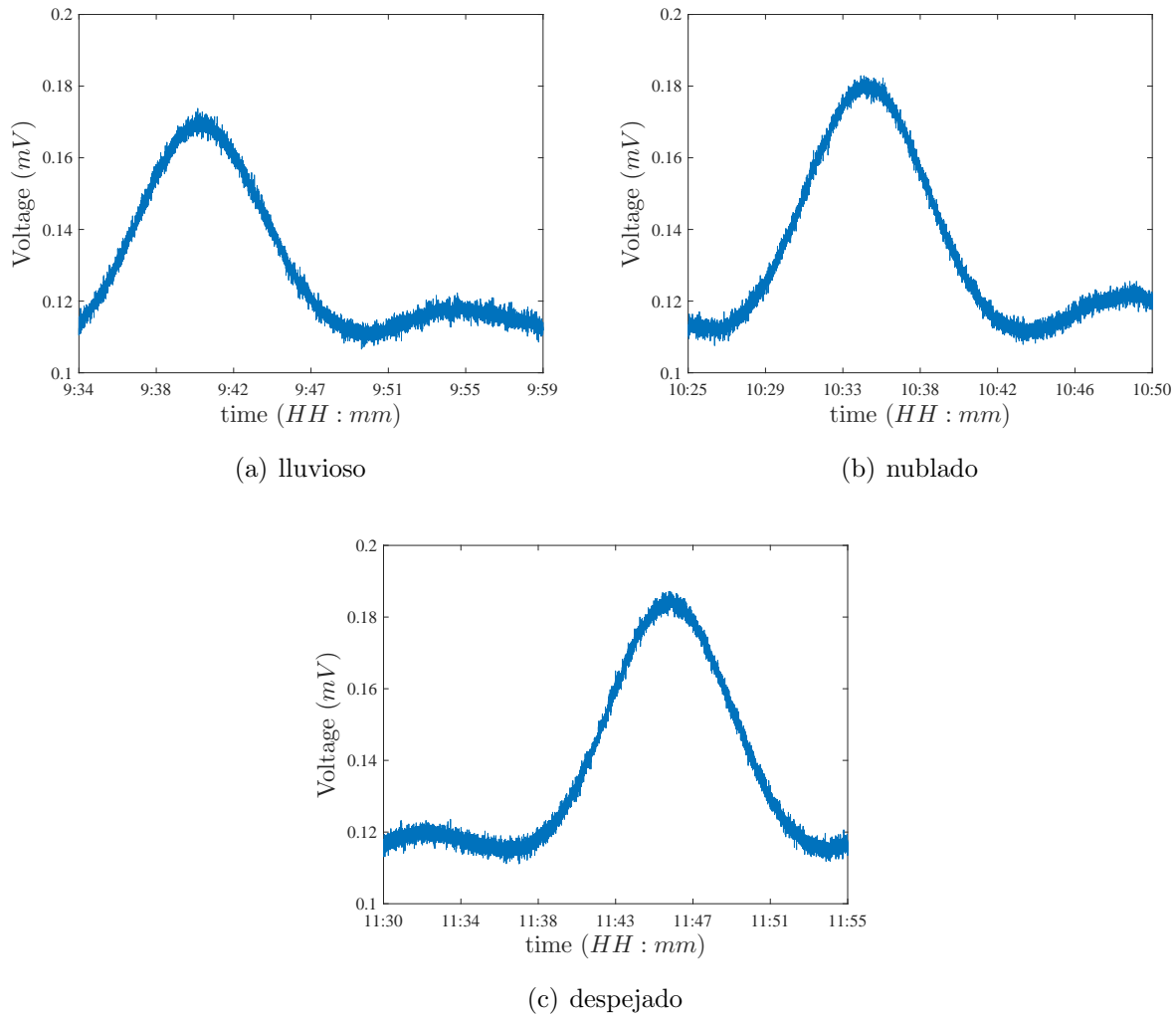
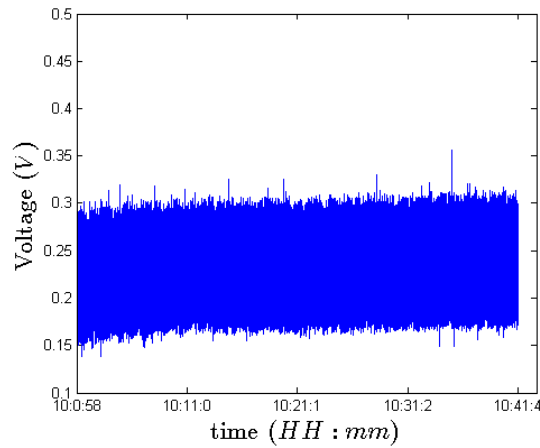


Figura 5.3: Observación solar según el clima.

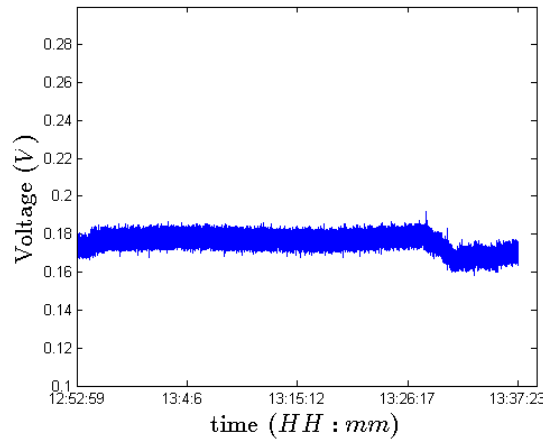
En general los datos obtenidos confirmaron que el radiotelescopio puede funcionar sin presentar limitaciones por cuestiones climatológicas, que los datos obtenidos presentan el mismo comportamiento sin importar la hora en que son tomados, y que variaciones en la forma de la gráfica pueden representar algún tipo de actividad por parte del Sol, ya que en general la gráfica es fluida y sus cambios son suaves y fluidos.

5.3 Seguimiento del Sol

Por medio de los software Orbitron y spid MD-01, se realizó el seguimiento del Sol, se hizo toma de datos con filtro y sin el (ver Figura 5.4). La señal obtenida no muestra cambios abruptos al paso del tiempo y a su vez es visiblemente constante, confirmando que el radiotelescopio no esta perdiendo alineación. La toma de datos tuvo una duración de 40 minutos para cada caso, de ser necesario es posible prolongar este tiempo, ya que el sistema no presentó ningún tipo de altercado



(a) Sin filtro



(b) Con filtro

Figura 5.4: Seguimiento del Sol.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se discutió la manera como se desarrolló un radiotelescopio para la observación del Sol en la banda Ku. Para ello se describió en detalle cada uno de las partes que componen el sistema del radiotelescopio, desde el proceso de ensamblaje de las partes que permiten el movimiento, hasta los componentes que permiten la captura y lectura de la señal.

Fue necesario realizar el diseño de una base de hierro apropiada para soportar el peso de la antena y la montura, esta base es resistente a los fuertes vientos presentes en la región. Adicionalmente diseños como el soporte del LNB, que presenta la menor área posible para no interferir con el flujo de la señal desde el cuerpo celeste a la antena y también el diseño de una caja de conexiones.

Se diseñó un filtro pasa bajo con frecuencia de corte 500 Hz en configuración Sallen-Key, que permitió eliminar el ruido presente en la señal obtenida del Sol; debido a que los cambios en la actividad solar pueden ser abruptos, este valor de frecuencia fue elegido a fin de evitar pérdidas de información y a su vez eliminar la mayor cantidad de ruido posible. Este filtro se conecta al buscador de satélites, más específicamente, de su galvanómetro el cual muestra la intensidad de señal recibida de la conexión hecha con el LNB.

Se empleó el software spid MD-01 proporcionado por el fabricante de la montura para el controlar el movimiento de la antena, esto permitió controlar la dirección en que se apuntaba, en este caso al Sol y capturar la señal recibida a través de una DAQ y un programa en MATLAB.

Se midió el transito solar para tres condiciones climáticas distintas a fin de identificar el comportamiento de la señal recibida, se identificó que la señal no tiene un cambio significativo cuando el clima es adverso y en ningún momento se incrementó el ruido.

Con lo desarrollado en este trabajo, se pudo demostrar que es posible hacer radioastronomía, partiendo de instrumentos propios de la televisión satelital, los cuales por su alta respuesta a las bajas intensidades de señal, permiten detectar cambios mínimos en la misma. Todo esto a muy bajos costos con relación a instrumentos diseñados para la radioastronomía específicamente.

Finalmente se pudo observar que este trabajo amplió las bandas de estudio en las cuales se observan cuerpos celestes desde el OAUTP. Esto permitirá a futuro estudiar otros objetos celestes cambiando, por ejemplo, el radiorreceptor por uno dedicado específicamente a radioastronomía ampliando con esto la frecuencia de recepción del sistema en general.

Bibliografía

- Bejarano, A., Ayala, O. A., y Quintero, E. A. (2010). Software para el diseño de filtros sallen-key. *Scientia et technica*, 16(45):118–123.
- Bhatia, R. S., Marti-Canales, J., De Matos, C., Fritzsche, B., Haiduk, F., Knoechel, U., y Furse, C. (2006). A simple radio telescope operating at ku band for educational purposes. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 48.
- Bianchi, V. (2004). Radioastronomía: Una mirada más amplia. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, pages 61–76.
- Blanco Cano, X. y Kajdic, P. (2019). El sol, nuestra estrella. *Revista Digital Universitaria*.
- Cleary, D. (1999). An amateur radio telescope for solar observation. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 93:40.
- del Pozo García, E. y Márquez, J. F. V. (2003). Dependencia de la intensidad del flujo protonico solar con los parametros del viento solar. *Revista Cubana de Física*, 20(1):26–31.
- Dhande, A. (2016). Design of radio telescope at ku band. *International journal of advanced and latest research in engineering science and technology*, 1.
- Dorado, D. J. y Grupo, A. (2007). Grote reber, 70 años del primer radiotelescopio. .
- Fanco, R. A., Quintero, E. A., y Ardila Urueña, W. (2010). Ecualizador de 3 bandas basado en filtros activos de segundo orden. *Scientia Et Technica*, 16(45).
- Figueredo, P. S. y Hernández, S. V. (2009). Prototipo de receptor radioastronómico de nueva generación en la banda ku del espectro electromagnético. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*.
- Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., y Romero, I. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *Editorial escuela Venezolana para la enseñanza de la química, Mérida*.

- Gómez-Tornero, J. L., Cañete-Rebenaque, D., Quesada-Pereira, F. D., y Álvarez-Melcón, A. (2010). Development of a small radio telescope at the technical university of cartagena: A duty with our students and society. In *Education Engineering (EDUCON), 2010 IEEE*, pages 1195–1201. IEEE.
- Jaramillo Alvarado, A. F., Rodríguez, G., David, H., y Quintero Salazar, E. A. (2017). Monitoreo del clima espacial desde colombia mediante radio receptores butterworth de orden superior. *Ingeniería*, 22(1):83–97.
- Knöchel, U., Haiduk, F., y Fritzsche, B. (2005). Radio astronomy at schools. .
- Mandal, P., Agarwal, D., Kumar, P., Yelikar, A., Soni, K., et al. (2016). Everyday radio telescope. *arXiv preprint arXiv:1601.02982*.
- Mendoza, B., RamÁrez, J., y Díaz Sandoval, R. (2006). Efectos de la actividad solar en el clima y en los seres vivos. *Revista Ciencia*, 57(7):32–38.
- Mendoza Torres, E., Lara Sanchez, A., y Hiriart Garcia, D. (2006). Ondas de radio procedentes del sol. *Revista Ciencia*, 57(1):14–22.
- Pratap, P. y Salah, J. E. (2001). Radio astronomy: A strong link between undergraduate education and research. *Journal of Science Education and Technology*, 10(2):127–136.
- Rodríguez, G., David, H., Quintero Salazar, E. A., y Cardona Torres, L. F. (2016). Development of a magnetic loop antenna for the detection of jovian radiowaves at 20.1 mhz. *Tecciencia*, 11(20):41–46.
- Rodríguez Taboada, R., Peterova, N., y Akhmedov, S. (1992). Espectros de radioemisión solar con máximo en la banda de longitudes de onda centimétricas cortas: marzo a mayo de 1976. *Geofísica Internacional*, 31(2).
- Sandoval Piqueras, F. J. et al. (2017). *Mejoras en el diseño de un mezclador en la banda de 1420 MHz para aplicaciones de radioastronomía*. Tesis, Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicación universidad politécnica de cartagena.
- Sasao, T. y Fletcher, A. B. (2005). Basic knowledge of radio astronomy. *Suwon: Ajou University*.
- Sawant, H., Neri, J., Fernandes, F., Cecatto, J., Sankararaman, M., Faria, C., Stephany, S., Rosa, R., Andrade, M., Alonso, E., et al. (2003). A low cost steerable radio-telescope. *Advances in Space Research*, 32(12):2715–2720.

- Stutzman, W. L. (1998). Estimating directivity and gain of antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 40(4):7–11.
- Tinti, M. (2013a). Construction of a 12 ghz total power radio telescope for teaching purposes, suitable for noisy environments, using satellite tv devices. *Progress In Electromagnetics Research*, 37:159–170.
- Tinti, M. (2013b). Construction of a 12 ghz total power radio telescope for teaching purposes, suitable for noisy environments, using satellite tv devices. *Progress In Electromagnetics Research*, 37:159–170.
- Valiente, J. F. y Del Pozo, E. (2001). Relación de la intensidad del flujo protónico con la heliolongitud y la radioemisión en las frecuencias de 3 y 5 ghz. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 2:12–18.

Anexo A

Guía de Operación del Radiotelescopio

A.1 Software requeridos para el funcionamiento del radiotelescopio

1. NI Max de National Instruments¹: Éste software es necesario para el reconocimiento de la DAQ y es aconsejable realizar una prueba de conexión antes de la toma de datos, para lo cual se llevan a cabo los siguientes pasos:
 - Ingresar al programa **NI Max**.
 - Despliegue la viñeta **Device and Interfaces** y seleccione **NI myDAQ “myDAQ1”** (ver Figura A.1) (el numero puede variar dependiendo de la instalación).
 - Seleccione la pestaña **Test Panel: NI myDAQ: “myDAQ1”** y de clic en **Start** (ver Figura A.2).
 - En este momento el programa debe comenzar a graficar en pantalla la señal ingresada a la DAQ por el pin análogo 0+ (esta configuración esta por defecto y si la DAQ no tiene ninguna señal conectada, mostrara solo ruido). De no suceder, verifique el cable USB y la DAQ.
2. Stellarium²: Este programa permite obtener la posición del Sol o de los satélites artificiales, datos que se utilizan como referencia para el apuntado del radiotelescopio.
3. Spid MD–01 de RF HAMDESIGN³: Este software es proporcionado por el fabricante de la montura y permite manipularla desde una computadora, así como hacer seguimiento. Para hacer uso de el se realiza lo siguiente:

¹<http://www.ni.com/product-documentation/53366/en/>

²<https://stellarium.org/es/>

³<http://www.rfhamdesign.com/index.php>

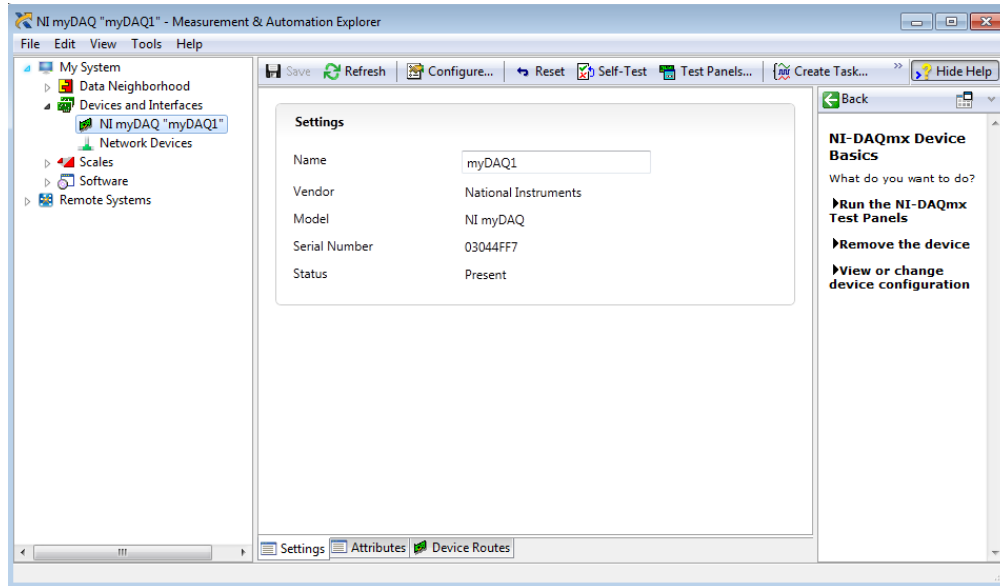


Figura A.1: NI Max para controlar la DAQ.

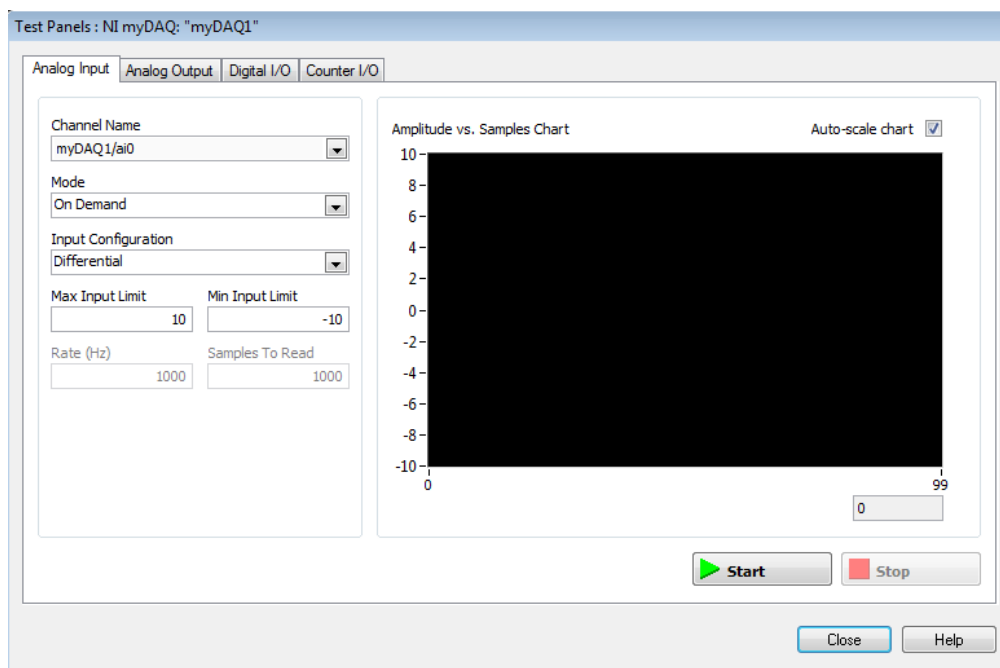


Figura A.2: Panel para verificar la conexión.

- Encender fuente de alimentación de la montura **PS-02** y el controlador **MD-02**.
- Iniciar el programa **spid MD-01** y verificar que en pantalla de la computadora se observan los mismos datos de posición, que la pantalla del controlador (ver Figura A.3).
- De no ser así, se verifica el cable USB del controlador a la computadora. También se puede verificar la configuración del controlador en el apartado **SET USB COM**, el cual debe mostrar **STATE: ON** (ver Figura A.4).

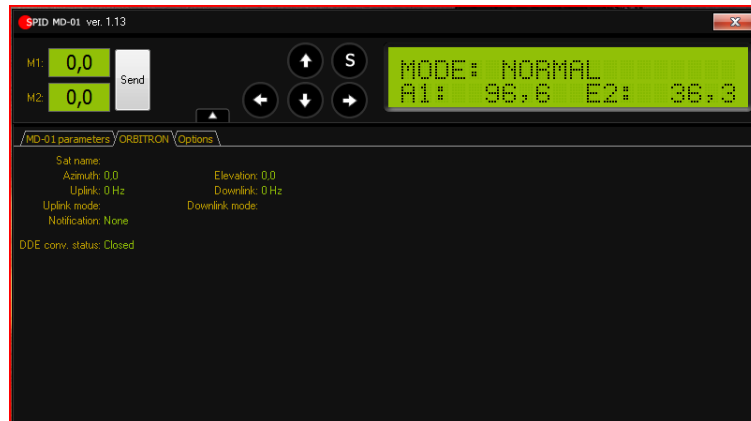


Figura A.3: Software del controlador de la montura.



Figura A.4: Conexión por USB para el controlador activada.

4. Orbitron de Sebastian Stoff⁴: Este Software se utiliza para realizar seguimiento con la montura, mediante la comunicación de éste con el spid MD-01.
5. MATLAB de MathWorks y Cleve Moler⁵: En éste programa se realiza una función que se encarga de recibir la información de la DAQ, graficarla y permite el almacenamiento, tanto de los datos como de las imágenes generadas.

A.2 Conexión

El primer paso a realizar (o verificar), es la conexión de todos los elementos presentes en el radiotelescopio. Partiendo del cable coaxial que proviene del LNB, el cual se conecta al

⁴<http://www.stoff.pl/downloads.php>

⁵<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

buscador de satélite por su lado izquierdo tomándolo de frente, este a su vez cuenta con dos cables en su parte posterior, uno de color azul correspondiente a la señal del galvanómetro y otro naranja que corresponde a la tierra, ambos cables deben conectarse al filtro (el cual esta etiquetado (ver Figura A.5)), el azul se conecta a **input** y el naranja a **GND**.

Posteriormente se conecta el filtro a la DAQ, tomando el cable de salida **output** y llevándolo al pin análogo **0+** de la DAQ, de igual forma debe conectarse el pin **0-** (ver Figura A.6) a **GND** en el filtro. También se conecta un cable de **0-** a el pin **AGND** de la DAQ. Por último se conecta la DAQ a la computadora por medio del cable USB.

También se debe conectar la fuente de alimentación del filtro, el cual requiere voltajes de +12 V, -12 V y tierra. Recordando que el filtro tiene las etiquetas necesarias para realizar estas conexiones.

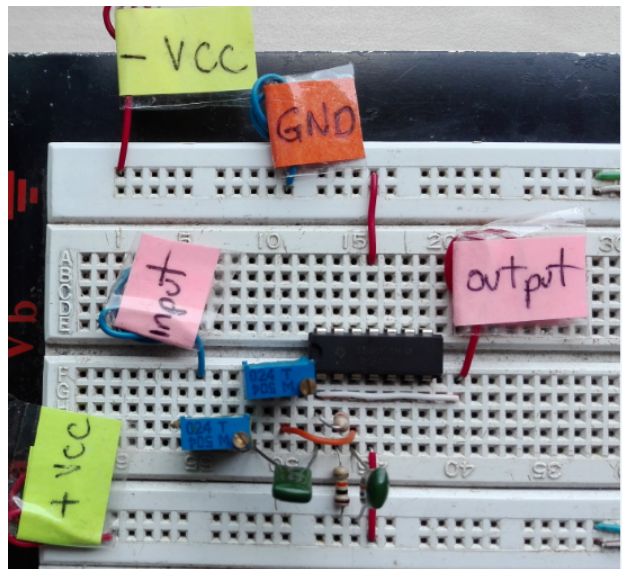


Figura A.5: Montaje filtro en protoboard.

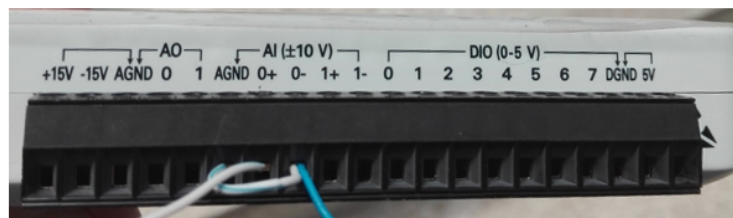


Figura A.6: Conexión DAQ.

A.3 Encendido

Se comienza por conectar al fluido de corriente eléctrica cada una de las fuentes de voltaje, las cuales son:

- Fuente PS-02 (de la montura ver Figura A.7).
- Controlador MD-02 (de la montura).
- Fuente del buscador de satélites con LNB (ver Figura A.8).
- Sistema de alimentación del filtro.



Figura A.7: Controlador y Fuente de alimentación.

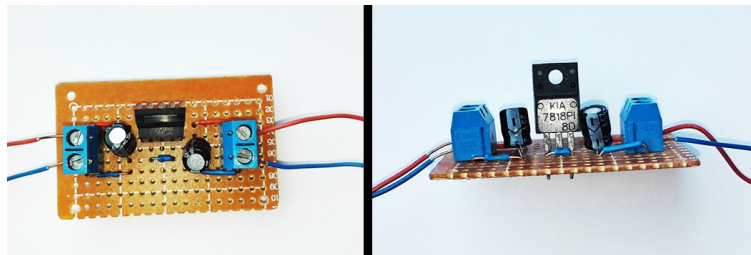


Figura A.8: Fuente de alimentación buscador de satélites y LNB.

Ahora se procede a encender cada una de las fuentes, teniendo en cuenta que la correspondiente al buscador de satélites no presenta un interruptor y se enciende automáticamente al conectarse. Se aconseja encender el buscador de satélites mínimo 5 minutos antes de la toma de datos para una mayor estabilidad en el galvanómetro, tenga en cuenta que el paso de personas cerca del buscador puede variar un poco la señal del mismo.

A.4 Alineación

NOTA: Los cables de la montura pueden enredarse con facilidad al desplazarse en acimut, por lo tanto es necesario verificar constantemente la posición de los mismo para evitar un daño en el sistema. Se aconseja verificarlos cada 60° . También se aconseja no exceder los 180° en altitud, ya que la antena tocaría la estructura.

Para realizar o verificar la alineación, se comienza por colocar la aguja del buscador de satélite A.9 en 5 girando el potenciómetro, esto mientras la antena no este apuntando a un objeto. El valor de 5 se tomará como referencia a lo largo de la adquisición de los datos. Ahora se toma el dato de posición del Sol o satélite artificial que servirá de guía (por medio de Stellarium). Teniendo estas coordenadas se varia la posición de la montura haciendo uso del controlador y los pulsadores de dirección (ver Figura A.10), siempre recordando revisar el cableado para evitar daños.



Figura A.9: Buscador de satélites.

Con la montura en la posición indicada por Stellarium se verifica que la aguja del buscador llegue a un valor de 7 o mayor, indicando la recepción de una señal. De no ser así se debe variar la posición entre 0° y $\pm 10^\circ$ en pasos de $0,2^\circ$ para ambas coordenadas (acimut y altitud), buscando el punto exacto en el cual la aguja del galvanómetro llega a un valor máximo, normalmente no es mayor a 9. Si el objeto celeste esta muy lejos de lo indicado por Stellarium es decir más de 10° de diferencia, se aconseja regresar a $0^\circ - 0^\circ$ y confirmar que sí este apuntando al norte y con elevación de 0° .

Ya apuntando a un objeto se corrige (de ser necesario) la posición que indica el controlador con respecto a Stellarium, para lo cual se oprime el pulsador **F** (ver Figura A.10) que se encuentra en el controlador, ingresando de esta manera al modo **Ángulo**, acá al presionar los pulsadores de dirección la montura no se moverá pero si cambian las coordenadas en la

pantalla. Después de tener las coordenadas en el valor indicado se presiona de nuevo **F** para regresar al modo **Normal**.



Figura A.10: Pulsadores (botones) controlador.

A.5 Manipulación por medio de spid MD-01

La montura se puede manipular desde una computadora como se menciono anteriormente, a través de un software A.3, con solo dar clic en los botones de dirección que están en pantalla. Las configuraciones que se realicen a la montura deben hacerse desde el controlador y no desde el software, ya que este no guarda los cambios y siempre regresa a la configuración de fabrica, afectando de esta manera la comunicación. Si esto sucede la configuración es la siguiente:

- Para seleccionar el tipo de motores:
 1. Ingresa al menú por haciendo uso del pulsador **S** ver Figura A.10 en el controlador.
 2. Mediante las flechas izquierda y derecha llegar a **MOTOR CONFIGURATION**, se selecciona esta opción de nuevo con el pulsador **S**.
 3. Se seleccionan la opción **1:AZ**, **2:EL**, en **TEMPLATE** ver Figura A.11 con las flechas de dirección arriba y abajo.
 4. Para regresar un paso en el menú se usa el pulsador **S** y para salir se pulsa **F**, siempre al intentar salir pregunta si se desea guardar.
- Para modificar la relación de los engranajes de movimiento:
 1. Ingresa al menú haciendo uso del pulsador **S** en el controlador.
 2. Mediante las flechas izquierda y derecha llegar a **SET MOTOR 1**, se selecciona esta opción de nuevo con el pulsador **S**.

3. De nuevo mediante las flechas izquierda y derecha llegar a **GEAR: 0.1890** ver Figura A.11, si muestra un valor distinto, se hace uso de las flechas de dirección arriba y abajo para cambiar el valor.
4. De nuevo para salir se pulsa **F**.



Figura A.11: Configuración de motores en la montura y configuración de la relación de engranajes.

A.6 Toma de datos por medio de tránsito del Sol

Para realizar la toma de datos se apunta el radiotelescopio a unas coordenadas por las cuales el Sol pasará 5 minutos después (ayudados de Stellarium y recuerde que el movimiento del radiotelescopio se puede efectuar con el controlador o con el software), mediante los siguientes pasos:

- Iniciar el programa **MATLAB**.
- Abrir un nuevo **Script** y copiar el código suministrado en esta guía.
- Después de correr el **Script** es posible guardar los datos dando clic derecho en **dato**, ubicado en la ventana **Workspace**
- Cuando se genere la gráfica se puede guardar con un nombre que especifique el día de la observación en el formato deseado.

Los datos guardados deben estar en formato *.mat* para usarlos de nuevo en MATLAB, y las gráficas pueden estar en formato *.eps* para ser anexadas en un documento de *latex* con formato vectorial. El tiempo de toma de datos para el transito debe ser mínimo de 25 minutos para observar bien el fenómeno.

```
format longg
close all
devices = daq.getDevices
```

```

s = daq.createSession('ni');
addAnalogInputChannel(s,'myDAQ1', 0, 'Voltage');
s.Rate = 500;
ini = datestr(now);
data = s.inputSingleScan;
[data,time] = s.startForeground;
s.DurationInSeconds = 5*60; % minutos de la toma de datos, se aconseja 25 min
s;
[data,time] = s.startForeground;
plot(time,data);
xlabel('Time (secs)');
ylabel('Voltage');
fin = datestr(now);

hora = str2double(ini(13:14));
min = str2double(ini(16:17));
seg = str2double(ini(19:20));
SegInicio = hora*3600 + min*60 + seg;

horaf = str2double(fin(13:14));
minf = str2double(fin(16:17));
segf = str2double(fin(19:20));

SegFinal = horaf*3600 + minf*60 + segf;
timevec = SegInicio:(SegFinal-SegInicio)/4:SegFinal';
lab = [];
for i = 1:length(timevec)
    horam = floor(timevec(i)/3600);
    minm = floor((timevec(i)/3600 - horam)*60);
    seg = floor(((timevec(i)/3600 - horam)*60-minm)*60);
    lab = char(lab, strcat(num2str(horam),':',num2str(minm),':', num2str(seg)));
end
lab = lab(2:end,:); %se elimina el prime datos vacio

plot(time,data)
set(gca,'XTick', time(1):(time(end)-time(1))/4:time(end),'XTickLabel',lab)

```

```
ylabel('Voltage $(V)$','FontUnits','points','interpreter',...
'latex', 'FontSize',17,'FontName','Times')
xlabel('time $(hh:mm:ss)$','FontUnits','points','interpreter',...
'latex', 'FontSize',17, 'FontName','Times')
```

Por último en caso de ser necesario se direcciona de nuevo el radiotelescopio y se reinicia la toma de datos.

A.7 Seguimiento con el radiotelescopio

Nota: Recuerde siempre estar atento a los cables de la montura ya que pueden enredarse y generar un daño en el sistema. Como en este apartado la montura se mueve automáticamente, debe estar seguro que no esta girando sin control, para esto esté pendiente de los valores en la pantalla del controlador.

Dadas las características del controlador MD-02, es posible utilizar el software Orbitron, el cual cuenta con un catalogo amplio de satélites artificiales, el Sol y la Luna. Este software utiliza un driver que permite la comunicación entre controlador y Orbitron, el cual es proporcionado por los mismos diseñadores. Antes de realizar el seguimiento es necesario iniciar el software **spid MD-01**, posteriormente se realizan los siguientes pasos:

- Iniciar el programa **Orbitron**.
- Ir a la ventana **Ubicación** (ver Figura A.12).
- Acá es posible seleccionar la ubicación del lugar de observación en la lista **World**, de no estar el lugar específicamente se puede crear una ubicación nueva ingresando el valor deseado en **Longitud** y **Latitud** y agregándola a la lista con un nombre adecuado.
- Ir a la ventana **Rotor/Radio** (ver Figura A.13).
- Seleccionar el objeto a observar (normalmente el Sol) en la opción **Objeto**.
- Seleccionar el **driver MyDDE** en la opción **Driver** (ver Figura A.13).
- Dar clic en el icono a la derecha del Driver para ejecutarlo.
- En este punto se abre automáticamente una ventana, que enseña la información de comunicación entre Orbitron y spid MD-01 (ver Figura A.14).
- Se regresa al programa **spid MD-01** y se ingresa a la pestaña **ORBITRON**.

- Se da doble clic en “DDE conv. status: close” para pasar al estado Opened. Iniciando de esta manera el seguimiento
- Para detener el seguimiento Orbitron con el spid MD-01, se da clic en el botón **S** en la ventana del spid MD-01 y seguidamente dar doble clic en “DDE conv. status:” para que quede en “Closed”, siempre verificando que la montura no siga en movimiento ya que podría ocasionar un daño en el cableado de la misma.

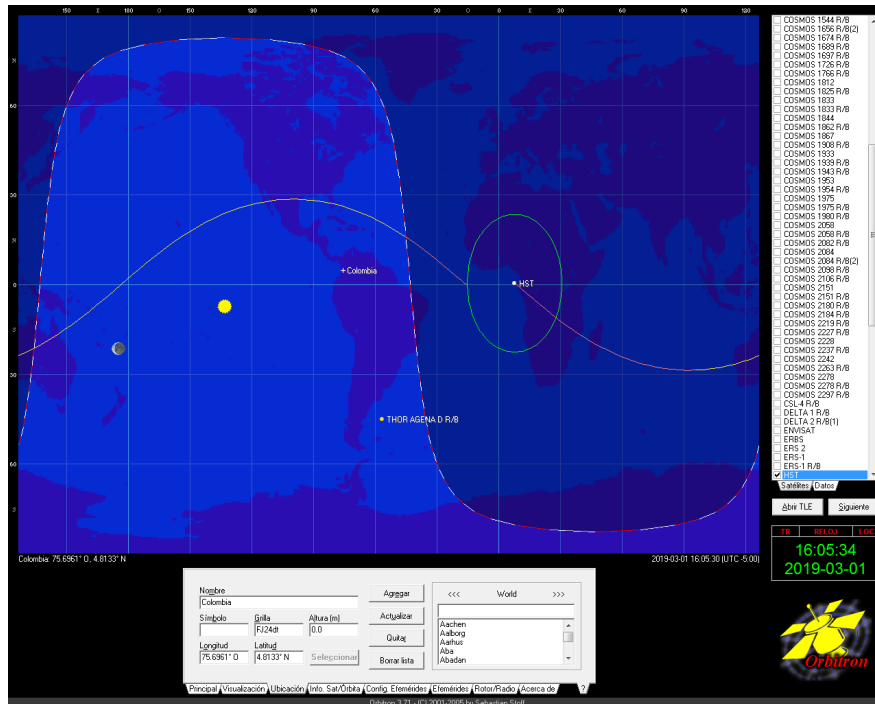


Figura A.12: Programa para el seguimiento, pestaña de ubicacion. Orbitron.

Nota: No mover de manera manual la montura mientras esta se encuentra en seguimiento ya que podría ocasionar un problema.

Cuando se finaliza la jornada se aconseja dejar la antena en 90° de altitud, ya que de esta manera disminuye el torque generado a la base.

Para configuraciones adicionales y un mejor conocimiento de la montura, tanto de forma manual como por medio de la computadora, se aconseja leer y seguir el manual del fabricante RF HAMDESIGN, ya que el controlador MD-02 cuenta con gran variedad de funciones que no aplican para un modelo de montura de alta resolución. De igual forma los manuales

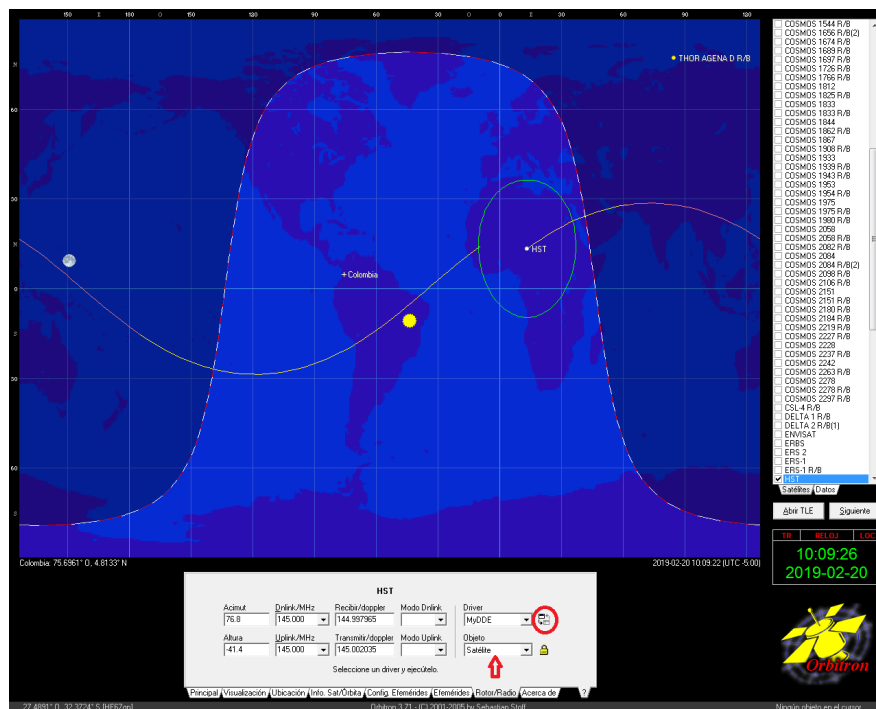


Figura A.13: Programa para el seguimiento, pestaña de seguimiento.

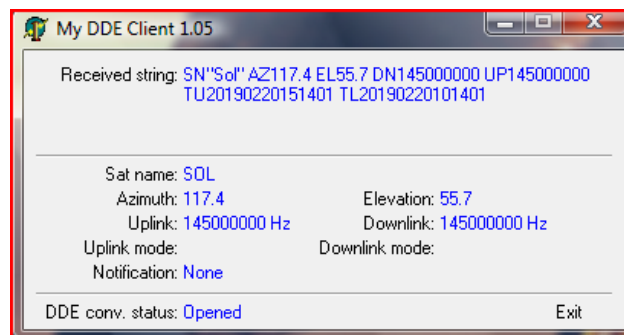
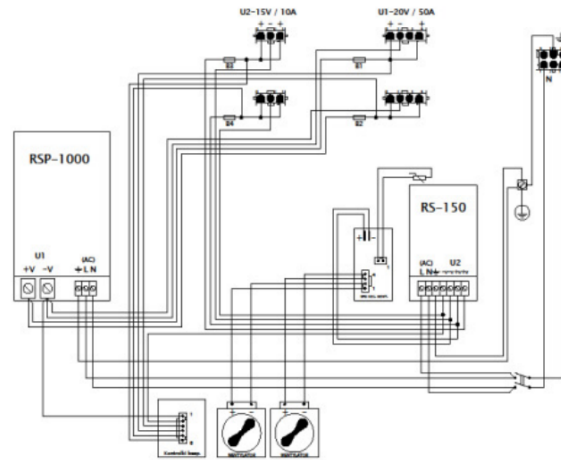


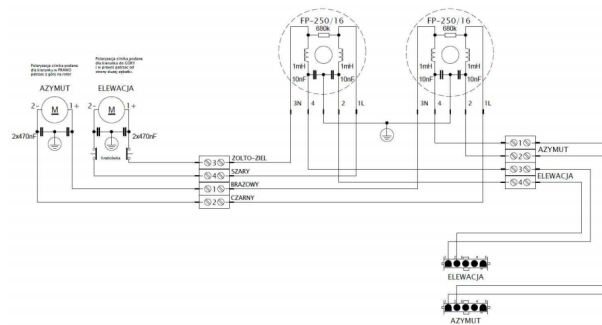
Figura A.14: Ventana de información suministrada para el seguimiento. My DDE.

proporcionados por el fabricante dan las herramientas para modificar características no mencionadas en este documento.

A.8 Diagramas de conexiones



(a)



(b)

Figura A.15: Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante1.

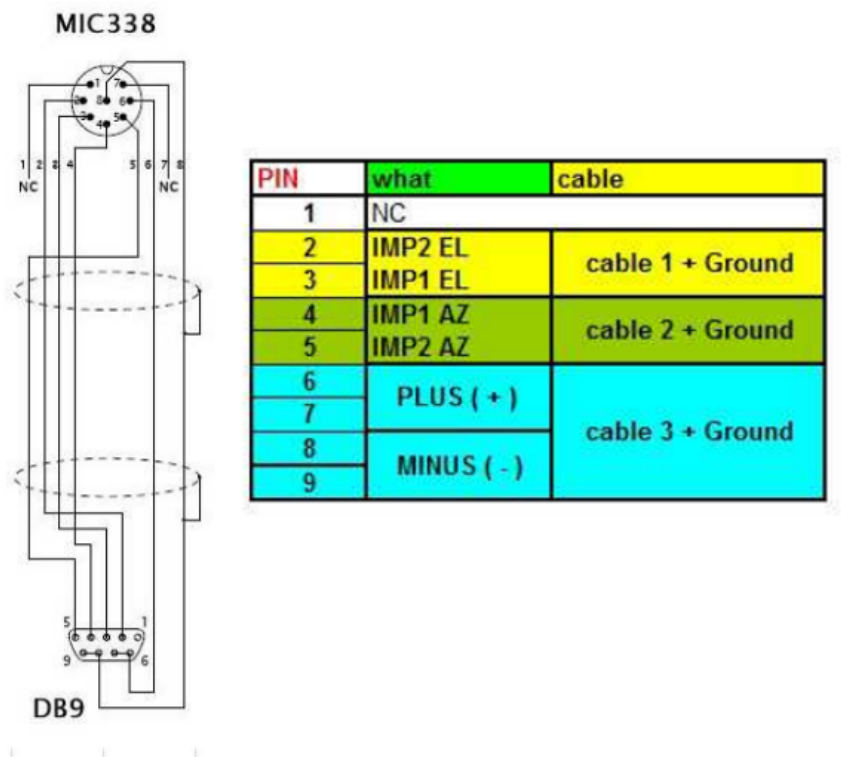


Figura A.16: Diagrama de conexiones otorgado por el fabricante 2.

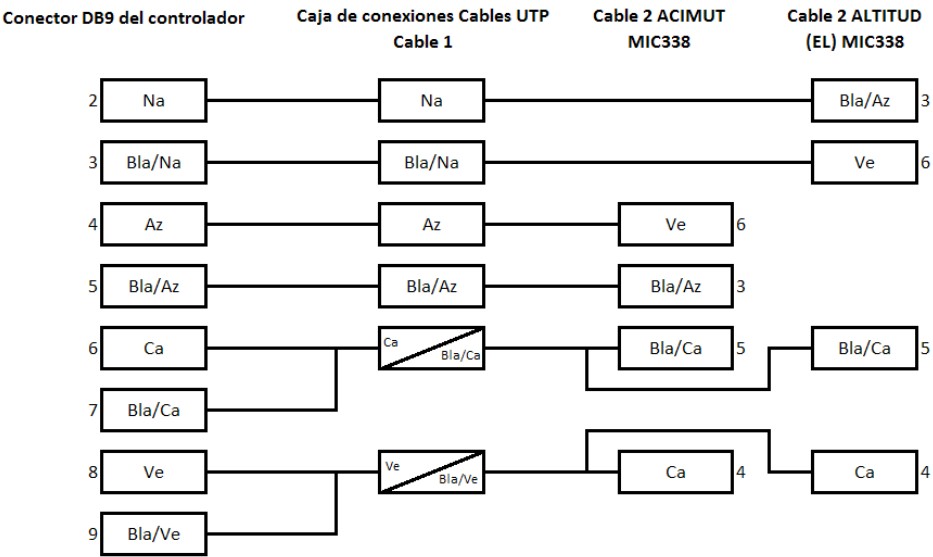


Figura A.17: Diagrama de conexiones elaborado en el OAUTP.